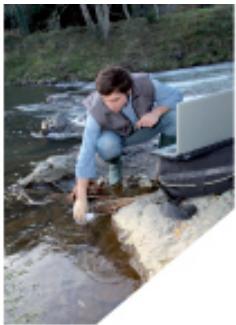


**Centre d'expertise
en analyse environnementale
du Québec**

Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales



Cahier 7

Méthodes de mesure du débit

3^e édition

Québec 

Coordination et rédaction : Manon Bernard
Direction des eaux usées
Direction générale des politiques de l'eau

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

Pour toute information complémentaire sur les activités du
Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
ou pour nous procurer nos documents, veuillez consulter notre site Web
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 : guide.echantillonnage@environnement.gouv.qc.ca

La série *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* comprend actuellement les cahiers suivants :

Cahier 1 Généralités	Cahier 5 Échantillonnage des sols
Cahier 2 Échantillonnage des rejets liquides	Cahier 6 Échantillonnage du fourrage pour l'analyse des fluorures
Cahier 3 Échantillonnage des eaux souterraines	Cahier 7 Méthodes de mesure du débit
Cahier 4 Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes	Cahier 8 Échantillonnage des matières dangereuses

Référence à citer

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, 2019. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales – Cahier 7 – Méthodes de mesure du débit*, Québec, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 249 pages et 6 annexes.

[En ligne] http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/debit_conduit_ouvrC7.pdf

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019

ISBN 978-2-550-84321-4 (PDF) (3e édition, 2019)

ISBN 978-2-550-55291-8 Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales
ISBN 978-2-550-55292-5 Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (version anglaise)

ISBN 978-2-550-55509-4 (PDF) (Édition : Août 2008)
ISBN 978-2-550-55309-0 (publié précédemment par Les éditions le Griffon d'argile, ISBN 2-89443-075-2, 1^{re} édition, 1998)

© Gouvernement du Québec, 2019

AVANT-PROPOS

Le cahier 7 du *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* traite des techniques reconnues d'évaluation des débits et des volumes d'eau prélevés ou rejetés par les entreprises, industries, municipalités ou autres organismes détenteurs d'autorisations délivrées par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et qui doivent faire état de leurs prélèvements ou rejets d'eau au Ministère.

Ce cahier traite des aspects théoriques et des bonnes pratiques à propos de la mesure du débit. Son contenu réunit des informations issues d'ouvrages techniques reconnus ou de l'expérience pratique de techniciens et professionnels collaborant au suivi environnemental au Québec. Il s'adresse aux personnes qui travaillent dans le domaine de la mesure du débit ou qui ont recours à ce type de services. Ce cahier a été écrit en vue de favoriser la compréhension des bases théoriques de la mesure du débit, ainsi que pour encadrer et uniformiser les méthodes de travail dans le but de faciliter les activités sur le terrain.

La présente édition du cahier 7 constitue une mise à jour en profondeur de ce dernier. Cette édition tient compte des nouvelles technologies disponibles ainsi que des mises à jour des ouvrages de référence dans le domaine de l'hydrométrie, dont les normes publiées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Plus complète que la version précédente, cette nouvelle édition couvre tous les types d'écoulement d'eau, qu'ils soient en conduite découverte ou sous pression.

Depuis la première édition du cahier 7, différents commentaires ont été transmis par les utilisateurs. Ceux-ci ont été considérés pour la présente mise à jour du cahier en vue d'en améliorer le contenu et de l'adapter aux développements récents et aux réalités du travail sur le terrain. C'est pourquoi des professionnels du domaine de la mesure du débit ont été consultés. Nous tenons à les remercier très sincèrement pour leur contribution.

Tout commentaire ou toute question concernant ce cahier peut être transmis à l'adresse suivante : guide.echantillonnage@environnement.gouv.qc.ca.

À PROPOS DU GUIDE D'ÉCHANTILLONNAGE À DES FINCS D'ANALYSES ENVIRONNEMENTALES

Le *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* regroupe une série de cahiers traitant précisément de l'échantillonnage de divers milieux environnementaux. Il décrit un ensemble de bonnes pratiques qui régissent la planification et la réalisation des travaux d'échantillonnage et vise ainsi à assurer la qualité des prélèvements ainsi que la validité des données scientifiques qui en découlent. Il est donc un ouvrage de référence qui rassemble l'information générale sur les pratiques d'échantillonnage reconnues.

Des règlements, directives, politiques ou autres documents relevant du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) font référence à un ou à plusieurs cahiers du guide.

Le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), à titre de responsable ministériel du *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales*, publie les cahiers du guide et coordonne leur mise à jour.

Lorsqu'une approbation du Ministère est requise en vertu d'un des cahiers du guide d'échantillonnage, la demande est adressée à la direction régionale concernée.

GLOSSAIRE

Pour les propos de ce cahier, les définitions suivantes s'appliquent. Le lecteur est invité à se référer à l'annexe 1 en ce qui concerne les notions de métrologie.

Bief :

Tronçon d'un canal entre deux sections définies.

Canal d'approche (chenal d'approche ou section d'approche) :

Bief d'un canal (chenal) immédiatement en amont de l'ouvrage de jaugeage, dans lequel des conditions d'écoulement appropriées doivent être établies pour assurer un jaugeage exact. Il peut s'agir d'un canal artificiel (ex. : en béton) ou naturel (ex. : fossé).

Capteur (sonde) :

Élément d'un **système de mesure** qui est directement soumis à l'action du phénomène, du corps ou de la substance portant la grandeur à mesurer.

Exemple : flotteur d'un appareil de mesure de niveau.

Conditionneur d'écoulement (tranquilliseur) :

Organe mécanique où l'écoulement est subdivisé en plusieurs parties et passe par des passages annulaires réduits. Il permet de réduire les turbulences et les perturbations de l'écoulement attribuables aux configurations de la conduite (ex. : coudes) ou survenues à la suite du passage d'un obstacle en amont ou près de l'élément de mesure, et il permet donc de réduire au minimum les erreurs de mesure.

Écoulement libre (dénoyé) :

Écoulement par-dessus une structure ou au travers d'elle, dans lequel le niveau d'eau en amont est indépendant du niveau d'eau en aval à un certain débit.

Écoulement noyé (non modulaire, submergé) :

Écoulement par-dessus une structure ou au travers d'elle, qui est affecté par les modifications du niveau d'eau en aval.

Jaugeage :

Ensemble des opérations nécessaires pour mesurer le débit d'un écoulement.

Limnigraphie :

Appareil de mesure des hauteurs d'eau qui permet leur enregistrement en continu.

Exemple : limnigraphes pneumatiques (aussi appelés « bulle à bulle »), à sonde de pression piézoélectrique et à ultrasons.

Limnimètre :

Élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau, constitué le plus souvent d'une échelle limnimétrique verticale ou inclinée placée près de la prise d'eau du limnigraphé sur laquelle on lit le niveau de l'eau lors des jaugeages.

Linéaire :

Un capteur est dit linéaire lorsque sa sensibilité est constante sur l'étendue de mesure.

Perte de charge :

Différence de charge totale entre deux sections.

Exemple : un déversoir occasionne un important rehaussement du niveau d'eau en amont et modifie les conditions d'écoulement des installations présentes, ce qui entraîne une perte de charge importante.

Voir annexe 2.

Principe de conservation de l'énergie :

Principe physique selon lequel l'énergie totale d'un système isolé ne varie pas dans le temps. L'énergie totale initiale du système isolé est donc égale à l'énergie totale finale, ce qui fait que de l'énergie peut passer d'une forme à une autre pendant la durée du phénomène sans qu'il y ait de création ni de disparition d'énergie.

Radier :

Partie la plus basse de la section transversale d'un canal naturel ou artificiel.

Rayon hydraulique (r_h) :

Dans un canal ouvert, rapport de la surface mouillée (A) (section droite du liquide) sur le périmètre mouillé (P) (périmètre de la conduite en contact avec le liquide) :

$$r_h = \frac{A}{P}$$

Relation hauteur – débit :

Courbe, équation ou tableau exprimant la relation entre la hauteur d'eau et le débit de l'écoulement dans un canal ouvert à une section transversale donnée à un moment précis.

Transducteur de mesure :

Dispositif, employé en mesurage, qui fait correspondre à une grandeur d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée (ex. : électrode de pH).

ACRONYMES ET SYMBOLES NORMALISÉS¹

α :	Angle (rad)
Δ :	Différence entre deux valeurs de la même grandeur (dimension variable)
A :	Surface (aire) (m ²)
B :	Étendue (largeur) (m)
F_r :	Nombre de Froude (sans dimension)
g :	Accélération due à la pesanteur (m/s ²)
K (ou C) :	Constante (dimension variable)
l :	Longueur (m)
μ, η :	Viscosité dynamique (Pa·s)
n :	Vitesse de rotation (rad/s)
P :	Hauteur du déversoir (m)
ρ :	Masse par unité de volume (densité ou masse spécifique) (kg/m ³)
Q :	Débit (m ³ /s)
Q_m :	Débit massique
Q_v :	Débit volumique
r :	Rayon (m)
R_e :	Nombre de Reynolds (sans dimension)
r_h :	Rayon hydraulique (m)
S :	Pente, pente du fond (sans dimension)
t :	Temps (s)
v :	Vitesse (m/s)
V :	Volume (m ³)
\bar{x} :	Valeur moyenne (dimension variable)

D'autres symboles présentés dans les différentes sections du cahier servent à identifier des éléments particuliers (ex. : des sections portant sur l'élément primaire), sans nécessairement présenter des symboles normalisés par ISO. Dans ce cas, la signification décrite dans la section concernée du cahier a préséance sur la présente liste d'acronymes et de symboles.

¹ Basés sur la norme internationale ISO 772 – Hydrométrie – Vocabulaire et symboles.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	i
À propos du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales	ii
Glossaire	iii
Acronymes et symboles normalisés.....	v
1 Introduction	1
2 Généralités	2
2.1 Définition de débit	2
2.2 Types de conduites.....	2
2.3 Types d'écoulement	2
2.3.1 Concept théorique d'un écoulement à surface libre	2
2.3.2 Concept théorique d'un écoulement sous pression.....	4
2.4 Débit volumique et débit massique.....	5
2.5 Modes de détermination des débits et des volumes d'eau	6
2.5.1 Mesure ponctuelle (estimation).....	6
2.5.2 Mesure directe en continu	6
2.6 Mesure du débit en fonction du type d'écoulement.....	7
2.6.1 Mesure du débit dans un écoulement à surface libre	8
2.6.2 Mesure du débit dans un écoulement sous pression.....	9
2.7 Installations types de mesure du débit en conduite découverte	10
2.8 Installations types de mesure de débit en conduite fermée sous pression	10
2.9 Critères de sélection, d'installation, d'entretien, de vérification de l'exactitude et d'étalonnage des équipements de mesure	10
2.9.1 Sélection de l'équipement de mesure.....	10
2.9.2 Installation, vérification de l'exactitude, ajustage, étalonnage et entretien	11
3 Installations de mesure dans un écoulement à surface libre	15
3.1 Classification des écoulements à surface libre.....	15
3.1.1 Écoulements stable et instable	15
3.1.2 Écoulements uniforme et non uniforme.....	16
3.1.3 Écoulements laminaire, transitoire et turbulent	16
3.1.4 Écoulements sous-critique, critique et surcritique	18
3.2 Éléments primaires	19
3.2.1 Généralités	19
3.2.2 Critères de conception généraux et particularités d'installation des éléments primaires	20
3.2.3 Point de mesure et puits de mesurage	20
3.2.4 Exactitude	22
3.2.5 Canaux jaugeurs – Généralités.....	25
3.2.6 Déversoirs – Généralités	62
3.3 Éléments secondaires	84
3.3.1 Classification des éléments secondaires	84
3.3.2 Appareils de mesure basés sur la pression différentielle	85
3.3.3 Appareils de mesure basés sur le temps de parcours	88

3.3.4 Comparaison des éléments secondaires	93
3.3.5 Programmation de l'élément secondaire	94
3.3.6 Entretien, vérification et étalonnage	95
4 Installation de mesure dans un écoulement sous pression.....	99
4.1 Généralités.....	99
4.2 Classification des débitmètres	99
4.3 Exactitude	100
4.4 Types d'appareils classés selon le principe de fonctionnement.....	101
4.4.1 Pression différentielle	101
4.4.2 Induction magnétique	107
4.4.3 Ultrasons	112
4.4.4 Énergie mécanique.....	117
5 Détermination de la capacité d'une pompe.....	126
5.1 Conditions de la détermination de la capacité d'une pompe.....	126
5.2 Méthode de détermination de la capacité de la pompe	126
5.2.1 Méthode volumétrique	127
5.2.2 Méthode utilisant un appareil de référence.....	130
5.3 Durée de l'essai pour la détermination de la capacité d'une pompe.....	133
5.4 Nombre d'essais pour la détermination de la capacité d'une pompe	133
5.5 Fréquence de la détermination de la capacité d'une pompe.....	134
5.6 Cause d'erreur dans la détermination de la capacité d'une pompe	134
6 Vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit ou du volume.....	136
6.1 Introduction	136
6.2 Schématisation d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit	136
6.3 Généralités.....	138
6.3.1 Système de mesure du débit.....	138
6.3.2 Débit de l'essai (volume cumulé)	138
6.3.3 Débit <i>in situ</i>	138
6.4 Étape de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit	139
6.4.1 Inspection visuelle de l'élément primaire	139
6.4.2 Vérification de l'exactitude de la mesure de l'élément secondaire	139
6.4.3 Vérification de la transmission au système informatique	141
6.4.4 Vérification de l'exactitude de l'élément primaire	141
6.4.5 Calcul de l'écart sur le système de mesure du débit en vérification	141
6.5 Nombre d'essais et intervalle de mesure du débit lors des essais	142
6.6 Interprétation des résultats	143
6.7 Évaluation de la conformité de l'installation	143
6.8 Conclusion et recommandations à la suite de la vérification de l'exactitude du système de mesure du débit.....	143
7 Méthode d'Exploration du champ des vitesses.....	146
7.1 Équipements de mesure utilisés pour l'application de la méthode d'exploration du champ des vitesses	149
7.1.1 Moulinet rotatif (aussi nommé courantomètre mécanique)	149

7.1.2	Moulinet électromagnétique (aussi nommé courantomètre électromagnétique)	152
7.1.3	Vélocimètre acoustique Doppler (aussi nommé courantomètre acoustique)	153
7.1.4	Débitmètre hauteur – vitesse Doppler et profileur de courant (ADCP)	157
7.1.5	Débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar	162
7.2	Entretien, vérification de l'exactitude et étalonnage.....	166
7.3	Détermination de l'emplacement de la section de mesurage.....	170
7.4	Mesurage de l'aire de la section mouillée.....	170
7.5	Mesurage de la vitesse	171
7.6	Établissement du nombre de verticales.....	171
7.7	Durée et fréquence des mesures de vitesse et nombre d'essais	172
7.8	Détermination de la vitesse moyenne sur une verticale	174
7.9	Causes d'erreur de la méthode d'exploration du champ des vitesses	178
7.10	Utilisation de la méthode d'exploration du champ des vitesses en présence d'un couvert de glace	179
7.11	Utilisation de la méthode d'exploration du champ des vitesses en tant que méthode de référence.....	179
8	Méthode de dilution d'un traceur.....	181
8.1	Généralités	181
8.2	Conditions d'application.....	182
8.3	Description de la méthode de dilution par intégration (ou injection instantanée)	184
8.4	Description de la méthode de dilution par injection à débit constant (ou en continu)	186
8.5	Réalisation des méthodes de dilution (intégration et débit constant)	189
8.5.1	Sélection du bief de mesurage	189
8.5.2	Choix du traceur.....	191
8.5.3	Détermination de la quantité de traceur	196
8.5.4	Équipements nécessaires pour les travaux de terrain	198
8.5.5	Injection du traceur	199
8.5.6	Prélèvement des échantillons	200
8.5.7	Analyse des résultats.....	202
8.5.8	Interprétation des résultats	202
8.5.9	Pourcentage de récupération	203
8.6	Réalisation d'un essai de dilution (par intégration ou à débit constant) à l'aide d'un traceur chimique et de la mesure en continu de la conductivité	204
8.6.1	Méthode par intégration (injection instantanée)	204
8.6.2	Injection en continu.....	206
8.7	Exemples (pour les deux méthodes)	208
8.8	Causes d'erreur de la méthode de dilution d'un traceur	208
8.9	Utilisation de la méthode de dilution d'un traceur en tant que méthode de référence.....	210
9	Méthode volumétrique.....	212
9.1	Principe de fonctionnement	212
9.2	Remplissage et vidange du récipient	213
9.3	Détermination du volume d'eau.....	213

9.4	Durée des essais	215
9.5	Nombre d'essais	216
9.6	Type de récipient.....	216
9.7	Volume du récipient	217
9.8	Mesure du niveau d'eau	218
9.9	Détermination de la masse du liquide	219
9.10	Détermination du volume massique du liquide.....	219
9.11	Causes d'erreur de la méthode volumétrique.....	220
9.12	Utilisation de la méthode volumétrique en tant que méthode de référence	221
10	Méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage	222
10.1	Description d'un poste de pompage	222
10.2	Aménagements possibles d'un poste de pompage	222
10.3	Différentes méthodes de mesure du débit impliquant un poste de pompage	223
10.4	Description de la méthode utilisant la capacité d'une pompe	223
10.5	Conditions d'application de la méthode utilisant la capacité d'une pompe	224
10.5.1	Informations sur le poste de pompage.....	224
10.5.2	Détermination de la capacité de la pompe (Q_p).....	224
10.5.3	Durée des essais	225
10.5.4	Nombre d'essais.....	225
10.6	Évaluation du système de mesure du débit <i>in situ</i>	225
10.7	Causes d'erreur de la méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage	226
10.8	Utilisation de la méthode basée sur la capacité d'une pompe d'un poste de pompage en tant que méthode de référence	226
11	Méthode utilisant un appareil de référence	228
11.1	Types d'appareils de référence.....	228
11.2	Conditions d'utilisation de l'appareil de référence	228
11.3	Conditions <i>in situ</i> à respecter préalablement aux essais	229
11.4	Détermination du volume d'eau et du débit	229
11.5	Durée et nombre d'essais	229
11.6	Causes d'erreur de la méthode utilisant un appareil de référence	230
11.7	Utilisation de la méthode impliquant un appareil de référence en tant que méthode de référence	230
12	Précisions relatives au rapport à produire.....	232
12.1	Contenu du rapport de vérification.....	232
12.2	Conservation du rapport	234
13	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	235

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Écoulements à surface libre et sous pression dans une conduite partiellement fermée	3
Figure 2 : Particularités d'un écoulement sous pression dans une conduite partiellement fermée	4
Figure 3 : Calcul du volume dans une conduite cylindrique sous pression.....	5
Figure 4 : Méthodes de mesures ponctuelles et directes en continu.....	7
Figure 5 : Relation entre le type d'écoulement et la méthode de mesure appliquée	8
Figure 6 : Classification des écoulements à surface libre.....	15
Figure 7 : Illustration d'un écoulement uniforme et non uniforme	16
Figure 8 : Illustration des écoulements laminaire, transitoire et turbulent	17
Figure 9 : Profil de vitesse d'un régime laminaire	18
Figure 10 : Profil de vitesse d'un régime turbulent.....	18
Figure 11 : Illustration de la ligne de charge et du point de mesure pour un déversoir	21
Figure 12 : Puits de mesurage d'un canal Parshall.....	22
Figure 13 : Vue en plan d'un canal de type Venturi.....	25
Figure 14 : Illustration d'un canal Parshall	27
Figure 15 : Caractéristiques physiques d'un canal Parshall et de l'écoulement.....	29
Figure 16 : Insertion du conduite d'aménée dans la section convergente – Méthode à éviter	33
Figure 17 : Conditions d'installation du canal d'approche du canal Parshall	34
Figure 18 : Canal Palmer-Bowlus de forme trapézoïdale	38
Figure 19 : Canal Palmer-Bowlus – Plasti-Fab inc. en écoulement libre.....	40
Figure 20 : Illustration générale des différentes sections d'un canal en H.....	49
Figure 21 : Vue en plan et de profil du canal d'approche, de la section de contrôle et de la sortie du canal en H	50
Figure 22 : Dimensions physiques d'un canal HS	52
Figure 23 : Dimensions physiques d'un canal en H.....	53
Figure 24 : Dimensions physiques d'un canal HL	54
Figure 25 : Exemples d'installation d'une conduite d'aménée	57
Figure 26 : Localisation du point de mesure en fonction du type de canal en H	59
Figure 27 : Localisation des mesures de hauteur d'eau h_1 et h_2	60
Figure 28 : Composantes d'un déversoir en mince paroi présentant des conditions d'écoulement libre	64
Figure 29 : Types de déversoirs en mince paroi selon la forme de l'échancrure	64
Figure 30 : Exemples de nappes déversantes sur un déversoir en mince paroi.....	65
Figure 31 : Caractéristiques d'un déversoir rectangulaire.....	66

Figure 32 : Caractéristiques d'un déversoir sans contraction latérale	66
Figure 33 : Caractéristiques d'un déversoir triangulaire	66
Figure 34 : Détails de la crête d'un déversoir en mince paroi	68
Figure 35 : Exemples de méthodes de mesure de la hauteur d'eau amont à partir du point zéro d'un déversoir sans contraction	69
Figure 36 : Relation du coefficient (C_d) selon l'angle du déversoir	74
Figure 37 : Illustration d'un écoulement noyé	75
Figure 38 : Déversoir à seuil épais rectangulaire	77
Figure 39 : Types de déversoirs à seuil épais – Vues de profil (gauche) et vues transversales (droite) ..	78
Figure 40 : Limite modulaire (S_l) en tant que fonction de h_l/l	80
Figure 41 : Classification des appareils de mesure de niveau	85
Figure 42 : Exemple d'installation du boîtier d'un débitmètre bulle à bulle et de la canne de bullage dans un canal Parshall	85
Figure 43 : Installation de la canne de bullage, partie biseautée vers l'intérieur du canal	86
Figure 44 : Fonctionnement d'une sonde hydrostatique	87
Figure 45 : Mesure de niveau par capteur ultrasonique	89
Figure 46 : Exemples d'installation d'un capteur ultrasonique	90
Figure 47 : Mesure du niveau par radar à ondes libres	91
Figure 48 : Mesure de niveau par radar à ondes guidées immergées	92
Figure 49 : Exemples d'installations de règles permanentes	96
Figure 50 : Exemples de plaques de référence	97
Figure 51 : Classification des débitmètres sur conduite fermée sous pression en fonction de leur principe de mesure	100
Figure 52 : Illustration générale d'un débitmètre à pression différentielle impliquant la présence d'un organe déprimogène	101
Figure 53 : Tube de Venturi (ou de Herschel)	102
Figure 54 : Diaphragme (plaqué à orifice)	103
Figure 55 : Tuyère à long rayon (a) et tuyère ISA (b)	103
Figure 56 : Cône de mesure	104
Figure 57 : Tube de Pitot – Mesure sur une ligne de mesure	105
Figure 58 : Tube de Pitot – Mesure à partir de plusieurs prises de pression	105
Figure 59 : Coupe transversale et fonctionnement d'un débitmètre électromagnétique non intrusif ..	108
Figure 60 : Débitmètre électromagnétique à insertion (AVI 5.0)	109
Figure 61 : Débitmètre électromagnétique à insertion (TORPEE-MAG)	109
Figure 62 : Types d'installations d'un débitmètre ultrasonique externe à temps de parcours (<i>clamp-on</i>)	113

Figure 63 : Débitmètre ultrasonique à insertion.....	113
Figure 64 : Modification du signal selon la variation de la vitesse d'écoulement	114
Figure 65 : Illustration du fonctionnement d'un débitmètre ultrasonique à effet Doppler.....	115
Figure 66 : Débitmètre à roue à aubes.....	117
Figure 67 : Débitmètre à palette	117
Figure 68 : Débitmètre à vortex	118
Figure 69 : Débitmètre à turbine	119
Figure 70 : Rotamètre.....	120
Figure 71 : Fonctionnement du débitmètre à déplacement positif	120
Figure 72 : Exemples de débitmètres Coriolis	121
Figure 73 : Fonctionnement d'un capteur composé de deux tubes parallèles	122
Figure 74 : Détermination de la capacité d'une pompe par la méthode volumétrique.....	127
Figure 75 : Exemple d'installation impliquant un appareil de référence installé temporairement sur une conduite fermée.....	131
Figure 76 : Schématisation de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit en conduite découverte ou fermée	137
Figure 77 : Schéma décisionnel des actions à poser selon les résultats de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit	144
Figure 78 : Exemples de distribution des vitesses dans une aire d'écoulement	146
Figure 79 : Exemple de courbe hauteur – débit.....	147
Figure 80 : Caractéristiques des appareils de mesure.....	148
Figure 81 : Moulinet rotatif à coupelles	149
Figure 82 : Moulinet rotatif à hélices (OTT C31).....	150
Figure 83 : Calcul du débit de l'essai à partir de la somme des débits de chacune des sections.....	151
Figure 84 : Moulinet électromagnétique (OTT MF pro).....	152
Figure 85 : Exemples de vélocimètres acoustiques Doppler.....	154
Figure 86 : Composantes d'un vélocimètre acoustique Doppler 3D (FlowTracker® de SonTek) et illustration du déplacement de l'ultrason entre le transducteur et les récepteurs.....	155
Figure 87 : Composantes du capteur de l'appareil ADC de OTT	155
Figure 88 : Exemple de profileur de courant (ADCP monostatique à quatre faisceaux)	158
Figure 89 : Exemples de montage de capteurs (MainFlo de Hydreka)	159
Figure 90 : Exemples d'angles du faisceau (Beluga de Flow-Tronic)	160
Figure 91 : Installation comportant un débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar (<i>RAVEN-EYE de Flow-Tronic</i>)	163
Figure 92 : Mesure de vitesse par le faisceau radar (RQ-30 de Sommer).....	164
Figure 93 : Incidence de la distance de la sonde sur la surface mesurée, pour un angle de $\pm 10^\circ$ (<i>RAVEN-EYE de Flow-Tronic</i>)	164

Figure 94 : Mesure de hauteur d'eau par un faisceau radar (RQ-30 de Sommer).....	165
Figure 95 : Illustration de la zone d'application de six verticales dans un canal à surface libre et à fond régulier.....	172
Figure 96 : Exemple d'une courbe de répartition des vitesses sur une verticale pour un écoulement laminaire	175
Figure 97 : Emplacement des points de mesure dans un cours d'eau naturel pour l'application des méthodes utilisant un nombre réduit de points	177
Figure 98 : Emplacement des points de mesure dans un canal artificiel rectangulaire pour l'application des méthodes utilisant un nombre réduit de points	177
Figure 99 : Méthodes utilisées pour la mesure du débit à l'aide d'éléments traceurs	181
Figure 100 : Dispersion latérale et verticale du traceur en fonction du bief de mesurage	182
Figure 101 : Courbes de réponse typique observées à plusieurs points latéraux à la suite d'une injection instantanée réalisée au centre d'un canal	182
Figure 102 : Illustration de la méthode de dilution par intégration.....	184
Figure 103 : Courbe théorique de restitution typique de la concentration en fonction du temps.....	184
Figure 104 : Superposition des courbes de la concentration en fonction du temps à la suite d'une injection instantanée de traceur.....	187
Figure 105 : Représentation du plateau obtenu au temps Tf	187
Figure 106 : Incidence de la longueur du bief sur les mesures obtenues à l'aide de la méthode par injection à débit constant	188
Figure 107 : Catégories et types de traceurs.....	191
Figure 108 : Exemples d'aménagement de la section de mesurage visant à limiter l'étendue de l'écoulement (haut) et exemple de dispositif de guidage du jet (bas).....	213
Figure 109 : Exemple de réservoir rectangulaire présentant un volume à retrancher	218
Figure 110 : Aménagements possibles d'un poste de pompage	223

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Avantages et désavantages des canaux jaugeurs	26
Tableau 2 : Dimensions standard (m) des canaux Parshall	30
Tableau 3 : Débits minimaux et maximaux recommandés pour les canaux Parshall en écoulement libre	31
Tableau 4 : Rapport de submersion (%) maximal en fonction des dimensions du canal Parshall	35
Tableau 5 : Équations de débit des canaux Parshall en écoulement libre	36
Tableau 6 : Dimensions standard (m) d'un canal Palmer-Bowlus selon Plasti-Fab inc.....	41
Tableau 7 : Intervalles de hauteurs et de débits pour les canaux Palmer-Bowlus.....	42
Tableau 8 : Équations de débit en écoulement libre – Plasti-Fab.....	46
Tableau 9 : Débits minimaux et maximaux recommandés en écoulement libre pour chacune des dimensions de canaux HS, H et HL.....	55
Tableau 10 : Table de débit (m^3/h) pour différentes hauteurs d'eau et dimensions de canaux HS, H et HL.....	56
Tableau 11 : Valeurs des variables pour l'application de l'équation de débit en écoulement libre (BOS)	60
Tableau 12 : Identification et description des composantes des déversoirs	63
Tableau 13 : Limites d'application des équations pour les types de déversoirs.....	70
Tableau 14 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir rectangulaire.....	71
Tableau 15 : Relation entre b/B , θ et β	71
Tableau 16 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir rectangulaire	72
Tableau 17 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir sans contraction	72
Tableau 18 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir sans contraction	73
Tableau 19 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir triangulaire	73
Tableau 20 : Valeur du coefficient « C » selon l'unité de mesure	74
Tableau 21 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir triangulaire.....	75
Tableau 22 : Limites d'application de l'équation en écoulement libre	81
Tableau 23 : Détermination du coefficient A_1 pour un déversoir rectangulaire à seuil épais.....	82
Tableau 24 : Exemple de calcul de débit pour un déversoir rectangulaire à seuil épais	82
Tableau 25 : Comparaison des éléments secondaires.....	93
Tableau 26 : Comparaison des diamètres de conduite pour différents débitmètres (en mm).....	106
Tableau 27 : Applications des débitmètres mécaniques.....	122
Tableau 28 : Équations déterminant la surface du poste de pompage.....	127
Tableau 29 : Exemple de détermination de la capacité de la pompe d'un poste isolé, à l'aide de la méthode volumétrique	130

Tableau 30 : Exemple de détermination de la capacité de la pompe d'un poste non isolé à l'aide de la méthode volumétrique	130
Tableau 31 : Exemple de détermination de la capacité d'une pompe à l'aide de la méthode utilisant un appareil de référence.....	131
Tableau 32 : Exemple de calcul d'écart entre les essais.....	133
Tableau 33 : Exemple de vérification d'un élément secondaire à l'aide d'une règle.....	140
Tableau 34 : Comparaison de l'écart obtenu sur les valeurs de hauteurs d'eau et de débits, basée sur l'équation théorique d'un canal Parshall de 0,914 m.....	141
Tableau 35 : Exemples de résultats de trois essais	143
Tableau 36 : Avantages et inconvénients de la méthode de dilution	183
Tableau 37 : Avantages et inconvénients de la méthode par intégration	186
Tableau 38 : Avantages et inconvénients de la méthode d'injection à débit constant	189
Tableau 39 : Caractéristiques des traceurs chimiques.....	192
Tableau 40 : Caractéristiques des traceurs colorants (ou fluorescents).....	194
Tableau 41: Paramètres à considérer pour la détermination de la quantité de traceur	197
Tableau 42 : Équations pour déterminer la quantité de traceur.....	198
Tableau 43 : Recommandations à appliquer lors de l'injection du traceur	199
Tableau 44 : Détermination de la concentration du traceur injecté (C_I)	201
Tableau 45 : Description des méthodes d'échantillonnage.....	201
Tableau 46 : Interprétation des résultats.....	203
Tableau 47 : Exemple – Comparaison des volumes totalisés au cours des trois essais par la méthode volumétrique et par le système de mesure <i>in situ</i>	214
Tableau 48 : Exemple – Comparaison du volume totalisé par la méthode volumétrique avec la moyenne des débits instantanés (1 donnée par minute) pendant une période de 5 minutes	214
Tableau 49 : Exemple – Comparaison du volume totalisé par la méthode volumétrique avec la moyenne des débits instantanés (1 donnée toutes les 15 secondes) pendant une période de 5 minutes.....	215
Tableau 50 : Exemple d'un essai présentant un écart supérieur à 10 % et nécessitant un essai supplémentaire.....	216
Tableau 51 : Exemples de volumes de récipients en fonction du débit de l'écoulement	218
Tableau 52 : Exemple – Méthode volumétrique utilisant la pesée.....	219
Tableau 53 : Mesure du volume sortant à partir de la capacité de la pompe et du temps de la vidange	224
Tableau 54 : Vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit <i>in situ</i>	225

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Métrologie	251
Annexe 2 : Concept de charge partielle et totale.....	258
Annexe 3 : Exemples de grilles d' inspection pour éléments primaire et secondaire	259
Annexe 4 : Exemples de grilles terrain pour la détermination de la capacité d'une pompe..	275
Annexe 5 : Exemples de grilles terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit.....	278
Annexe 6 : Exemple d'évaluation d'un rapport de vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit.....	299

1 INTRODUCTION

Des méthodes de mesure du débit précises et uniformes sont requises dans divers domaines, qu'il s'agisse d'effluents industriels, municipaux, agricoles ou autres. En effet, la mesure du débit répond à des objectifs multiples.

Elle permet, par exemple, d'établir la charge polluante d'un rejet, de connaître les variations de débit ou de charge d'un effluent par rapport au temps, de dimensionner les équipements de mesure et de traitement des effluents et de l'eau d'alimentation, de mesurer, de localiser, d'analyser et de résoudre différents problèmes de réseaux de collecte et de distribution de l'eau, d'évaluer la performance des équipements de traitement ou encore de déterminer la qualité des plans d'eau et de quantifier la ressource d'eau disponible.

Dans le contexte environnemental, la mesure du débit est aussi nécessaire pour l'application des lois et règlements. De façon plus précise, elle permet de mesurer, dans le cadre d'un programme d'autosurveillance, les volumes d'eau prélevés, consommés ou rejetés, de mesurer les charges polluantes d'un effluent ou encore de vérifier l'exactitude d'un système de mesure *in situ* sur la base de méthodes de vérification reconnues par le Ministère.

Les données ainsi obtenues permettent par la suite de dresser des états de situation et d'améliorer le cadre réglementaire pour responsabiliser les acteurs de l'eau, contribuer à l'application du principe utilisateur-payeur et respecter les ententes intergouvernementales.

Ce cahier a donc pour but d'aider à la compréhension des principes de mesure du débit, de contribuer à l'installation conforme d'un système de mesure *in situ*, d'encadrer la vérification de l'exactitude d'un système de mesure, que ce soit par des inspections visuelles ou par des mesures ponctuelles de débit qui permettront d'établir l'écart du système de mesure en place par rapport à une méthode de référence.

Les clientèles visées sont multiples, des opérateurs municipaux, industriels ou agricoles aux firmes de consultants procédant à la vérification de l'exactitude des systèmes de mesure de débit, en passant par les inspecteurs, techniciens et professionnels du Ministère.

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) :

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

La détermination du débit peut être obtenue à partir de l'équation générale suivante :

$$Q = A \times v \quad (2)$$

Où Q débit (ex. : m^3/s);

v vitesse de l'écoulement (ex. : m/s);

A aire de la section mouillée perpendiculaire à l'écoulement (ex. : m^2).

Le débit peut être mesuré dans différents types de conduites, et les méthodes pour effectuer cette mesure varient selon les types de conduites et d'écoulement ainsi que l'importance du débit de l'écoulement.

2.2 TYPES DE CONDUITES

Trois types de conduites sont utilisés pour le prélèvement, le transport ou le rejet de l'eau. Il s'agit des conduites découvertes, telles que les rivières ou les canaux jaugeurs, des conduites partiellement fermées, telles que les ponceaux, et des conduites fermées, telles que les réseaux de distribution d'eau potable. Ces conduites peuvent être naturelles, comme dans le cas des ruisseaux et des rivières, ou encore artificielles, comme en ce qui concerne les canaux, les fossés de drainage, les réseaux de distribution d'eau ou les réseaux d'égout. Le type de conduite influencera directement l'écoulement rencontré dans une installation donnée.

2.3 TYPES D'ÉCOULEMENT

Les écoulements peuvent être classifiés en deux types, soit à surface libre ou sous pression (ou en charge).

2.3.1 Concept théorique d'un écoulement à surface libre

Le terme « écoulement à surface libre » s'applique lorsque la surface de l'écoulement demeure toujours en contact avec l'atmosphère. La surface de l'eau est dans ce cas soumise à la pression atmosphérique. La vitesse de l'écoulement dépend alors du gradient de la pente de la conduite et de la résistance frictionnelle aux parois. Étant donné que le résultat de l'équation 2 précédemment énoncé ne change pas, les variables de l'équation doivent donc s'ajuster comme l'énonce le principe de conservation de l'énergie.

Dans ce type d'écoulement, la vitesse (v) et l'aire (A) sont les deux variables qui doivent être mesurées dans l'évaluation du débit (Q) lorsqu'aucun dispositif de mesure n'est installé dans la conduite découverte. Cela s'exprime par l'équation 2, où l'aire de la section mouillée (m^2)

d'une conduite rectangulaire correspond à :

$$A = h \times B \quad (3)$$

Où h hauteur de l'écoulement (ex. : m);
 B largeur de la section (ex. : m) (valeur constante).

Ce qui permet finalement d'obtenir la formule détaillée suivante :

$$Q = v \times h \times B \quad (4)$$

Selon cette équation, si on présume que le débit demeure constant, lorsqu'un changement de vitesse est imposé ou induit à l'écoulement (par exemple, à l'intérieur d'un élément primaire), la hauteur de l'écoulement doit s'ajuster pour respecter l'équation. Ainsi, 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 baisse du niveau de la surface d'écoulement de l'eau alors constatée est nommée rabattement.

Un canal Parshall est un exemple de dispositif de mesure (élément primaire) qui illustre bien le phénomène du changement de hauteur lorsque la vitesse augmente. Quand l'eau entre dans le canal, elle accélère dans la section convergente pour atteindre une vitesse maximale lorsqu'elle passe dans la section de contrôle (étranglement) dont la pente du plancher est descendante, ce qui provoque une baisse importante du niveau d'eau au niveau de l'étranglement.

Le principe de l'équation 4 peut être appliqué pour des conduites découvertes de formes diversifiées.

L'écoulement à surface libre se rencontre habituellement en conduite découverte, comme dans le cas des canaux d'irrigation, mais peut également se voir en conduite partiellement fermée, telle que les ponceaux dans lesquels l'écoulement ne se fait pas au maximum de sa capacité (Figure 1).

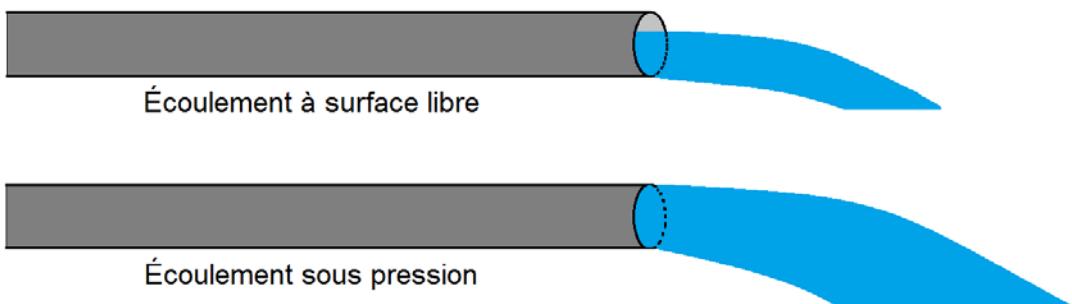


Figure 1 : Écoulements à surface libre et sous pression dans une conduite partiellement fermée

2.3.2 Concept théorique d'un écoulement sous pression

L'écoulement est dit sous pression (ou « en charge ») lorsque le liquide est confiné dans une conduite fermée et qu'il est soumis à une pression supérieure à la pression atmosphérique, comme dans les systèmes d'adduction et de distribution d'eau potable.

Toutefois, une conduite partiellement fermée peut devenir en écoulement sous pression lorsque l'écoulement se fait au maximum de sa capacité (Figure 1). Dans ce cas, l'écoulement dans la conduite ne se fait plus en fonction de la pression de l'air, mais plutôt en fonction de la pression de l'eau qui est exercée en amont de la conduite. La vitesse de l'écoulement dans la conduite devient alors plus grande que si l'écoulement était à surface libre.

Les ponceaux dont l'écoulement se fait au maximum de la capacité de la conduite sont un exemple de conduite partiellement fermée possédant les caractéristiques d'un écoulement sous pression.

L'exemple du réservoir d'eau peut aider à comprendre ce phénomène (Figure 2). Un tuyau installé dans le bas d'un réservoir plein possède un débit plus élevé qu'un tuyau installé dans la partie supérieure du réservoir à cause de la pression plus élevée exercée sur l'écoulement de l'eau. La vitesse de l'écoulement est donc plus élevée dans le tuyau de sortie située dans le bas du réservoir.

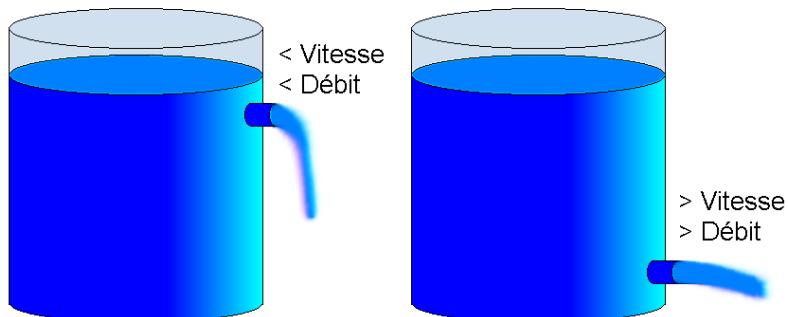


Figure 2 : Particularités d'un écoulement sous pression dans une conduite partiellement fermée

Dans les conduites fermées ou partiellement fermées, les changements de pression se traduisent par une variation de la vitesse d'écoulement, alors que l'aire de la section mouillée demeure constante.

Dans le cas d'une conduite cylindrique sous pression (Figure 3), la détermination du volume (V) d'une section est obtenue par la multiplication de l'aire (A) par la longueur (l) de la section considérée. Dans ce cas-ci, la variable A est constante et correspond à πr^2 , où r est le rayon interne de la conduite.

$$A = \pi r^2 \quad (5)$$

$$V = A \times l \quad (6)$$

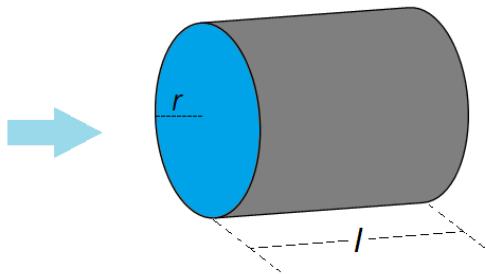


Figure 3 : Calcul du volume dans une conduite cylindrique sous pression

2.4 DÉBIT VOLUMIQUE ET DÉBIT MASSIQUE

Pour exprimer un débit volumique (Q_V), il est nécessaire que l'une des variables soit fonction du temps. Si l'on tient pour acquis que l'aire (A) est constante, l'autre variable (l) s'exprime comme une distance de déplacement dans l'espace en fonction du temps. L'expression de la longueur de déplacement (Δl), en fonction du temps (Δt), donne v , soit la vitesse d'écoulement au travers de la conduite :

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (7)$$

Si on remplace dans l'équation 6 la variable (l) par sa valeur établie à l'équation 7, l'équation devient :

$$V = A \times v \times \Delta t \quad (8)$$

De même, si on remplace (V) dans l'équation 1 par sa valeur établie à l'équation 8, l'équation de débit revient alors à l'équation 2.

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

Bien que la mesure du débit soit plus souvent associée au débit volumique, le débit peut également être utilisé pour exprimer le passage d'une quantité de matière (exprimée en masse) à travers une section à chaque unité de temps. Pour exprimer ce débit massique (Q_m), il est nécessaire de modifier l'équation 2 par le facteur de densité du fluide mesuré, qui peut être différent de celui de l'eau, qui est de $1\ 000 \text{ kg/m}^3$. Il peut également être important de considérer la température du fluide, car celle-ci influence la valeur du facteur de densité. Ainsi, l'équation devient :

$$Q_m = \rho \times A \times v \quad (9)$$

Où Q_m débit massique (kg/s);
 ρ facteur de densité du liquide (kg/m^3);
 A aire de la section (m^2);
 v vitesse du liquide au travers de l'aire de la section (m/s).

Cette équation convient lorsque la masse du fluide est requise pour des applications particulières (ex. : pour connaître la masse des résidus miniers liquides rejetés dans une aire d'accumulation).

2.5 MODES DE DÉTERMINATION DES DÉBITS ET DES VOLUMES D'EAU

On peut déterminer les débits et les volumes d'eau en écoulement en mesurant de façon continue la quantité d'eau qui circule dans l'installation d'écoulement conçue à cet effet, ou encore en l'estimant par une mesure ponctuelle dans le temps.

2.5.1 Mesure ponctuelle (estimation)

Les mesures ponctuelles 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. Cependant, une valeur provenant d'une mesure instantanée du débit peut être associée à une période de temps plus ou moins longue si l'on présume que l'écoulement a été constant tout au long de la période qui sépare deux mesures.

Les mesures ponctuelles servent essentiellement à :

- Vérifier la conformité de certains ouvrages hydrauliques (ex. : canaux de mesure);
- Établir la capacité d'un système de mesure (ex. : déterminer la capacité d'une pompe);
- Établir le débit instantané d'un écoulement stable (ex. : effluent à la sortie d'un étang d'aération prolongée) dans le but de l'extrapoler sur une période plus longue;
- Établir de façon rapide le débit d'un écoulement;
- Déterminer les dimensions des équipements hydrauliques qui devraient être installés pour le transport ou le traitement des eaux.

La Figure 4 présente les méthodes généralement utilisées pour effectuer ce type de mesure, soit :

- La méthode volumétrique;
- La méthode de dilution à l'aide d'éléments traceurs;
- La méthode d'exploration du champ des vitesses;
- La méthode utilisant un appareil de référence;
- La méthode utilisant la capacité de la pompe;
- La méthode utilisant une structure hydraulique (lecture ponctuelle de la hauteur d'eau dans un élément primaire).

2.5.2 Mesure directe en continu

Le principe de la mesure directe en continu repose sur le fait que la totalité de l'eau en écoulement est mesurée et enregistrée, ou cumulée, avec une exactitude jugée acceptable.

Les mesures du débit en continu sont constituées d'un ensemble de mesures ponctuelles effectuées à des intervalles de temps très rapprochés (quelques secondes), par des appareils pouvant enregistrer les valeurs obtenues tout au long de l'événement. Outre le volume ou le débit, il est aussi possible, dans certains cas particuliers, de mesurer d'autres paramètres représentatifs, tels que la masse de l'eau ou sa vitesse, et de les convertir ensuite en volume d'eau ou en débit.

Ainsi, une méthode ponctuelle jumelée à un enregistrement en continu de la totalité de l'eau peut devenir une méthode de mesure en continu (Figure 4). C'est le cas pour les méthodes utilisant une structure hydraulique (élément primaire temporaire ou permanent), un appareil de référence ou la capacité d'une pompe, ou encore pour la méthode volumétrique.

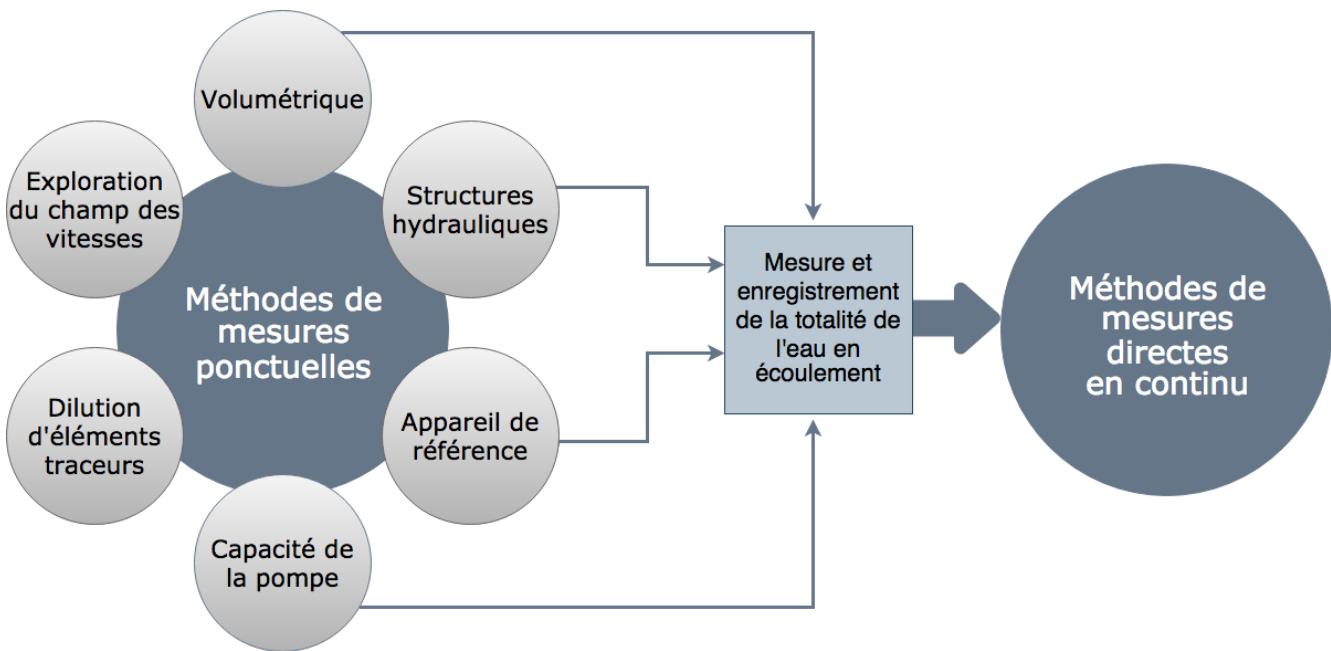


Figure 4 : Méthodes de mesures ponctuelles et directes en continu

L'avantage des mesures directes en continu 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.

2.6 MESURE DU DÉBIT EN FONCTION DU TYPE D'ÉCOULEMENT

La Figure 5 présente la relation entre les types d'écoulement et la méthode de mesure appliquée (ponctuelle ou en continu).

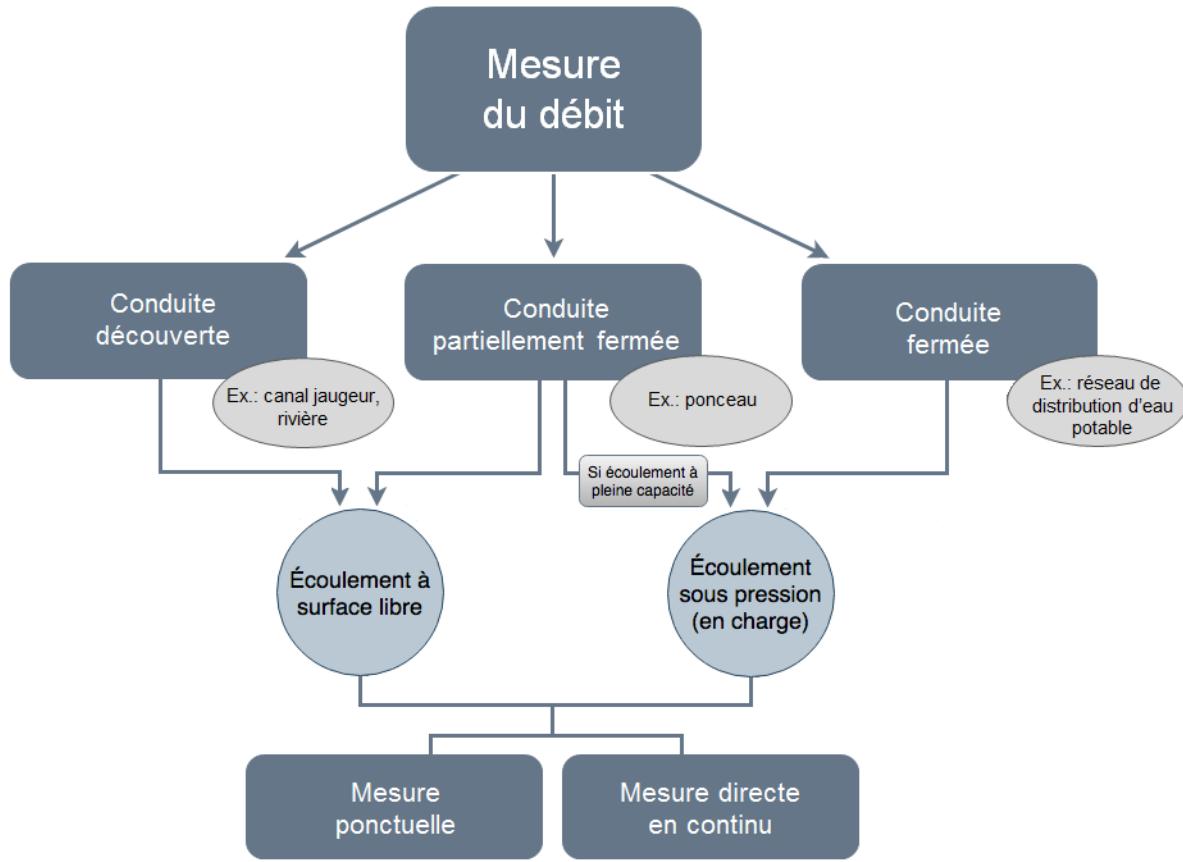


Figure 5 : Relation entre le type d’écoulement et la méthode de mesure appliquée

2.6.1 Mesure du débit dans un écoulement à surface libre

L’une des façons simples et rapides de déterminer le débit dans des conditions d’écoulement à surface libre consiste à utiliser un élément primaire, tel qu’un canal jaugeur, dont les courbes de relation hauteur – débit ou les tables de débit sont déjà établies.

Les tables de débit contenues dans le manuel *ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook* (Teledyne ISCO), huitième édition ou édition plus récente, ou encore celles fournies par le fabricant, sont des exemples d’outils pouvant être utilisés à cette fin.

La mesure de la hauteur de l’écoulement de façon instantanée ou en continu à l’aide d’un débitmètre permet ainsi de connaître le débit par cette seule mesure. Il importe de respecter les conditions physiques de l’installation, car les courbes et les tables de débit sont établies à partir d’installations standard. Toute modification physique ne respectant pas les exigences implique une vérification de l’exactitude de l’élément primaire.

L’autre façon de mesurer le débit consiste à mesurer la vitesse moyenne de l’écoulement et l’aire de la section mouillée. L’utilisation de l’équation 4 est alors nécessaire pour calculer le débit. Cependant, la mesure de la vitesse de l’écoulement nécessite le recours à un moulinet hydrométrique ou à un autre appareil pouvant évaluer la vitesse à l’aide de différents principes

physiques (mécanique, ultrasonique, effet Doppler, électromagnétique, etc.). L’élaboration d’une courbe de jaugeage préparée à partir de plusieurs mesures effectuées à différentes gammes de débits permet par la suite d’établir une relation hauteur – débit. Jumulé à un appareil de mesure de la hauteur d’eau, cette relation hauteur – débit permet de déterminer le débit de façon continue.

2.6.2 Mesure du débit dans un écoulement sous pression

La mesure du débit sur une conduite fermée dont l’écoulement se fait sous pression peut être effectuée par des débitmètres ainsi que par des compteurs. Dans ce type d’écoulement, la mesure du débit se base sur différents principes en fonction du type d’équipement en place. L’équipement choisi doit être adapté à la gamme du débit à mesurer et à la nature du liquide.

Les compteurs fournissent une valeur cumulative du volume total qui s’est écoulé sur une période de temps donnée (ex. : volume totalisé pendant une période de 24 heures). Quant aux débitmètres, ils effectuent un grand nombre de mesures instantanées du volume d’eau par rapport au temps à des intervalles rapprochés (ex. : une mesure chaque seconde) et compilent ces mesures. Les débits exprimant le volume d’eau déplacé par unité de temps et l’addition de tous les débits mesurés pour chacun des intervalles fournissent le volume d’eau total déplacé au cours de la période visée.

De plus, les débitmètres munis d’un système d’acquisition de données ou reliés à un tel système permettent de faire ressortir toutes les variations de débit survenues au cours de la période visée (ex. : débits minimal, maximal, moyen), ce qui n’est pas possible avec un compteur.

Le choix entre un compteur et un débitmètre est fonction des besoins et des exigences de suivi de l’effluent.

Dans le cas des débitmètres, la méthode utilisée pour déterminer le débit peut se baser sur un différentiel de pression créé par une restriction à l’intérieur de la conduite. La pression est mesurée en amont et au niveau de la restriction où se produit une augmentation de la vitesse accompagnée par une diminution de la pression. Le fonctionnement des débitmètres Venturi, à plaque à orifice ou à cône en V, se base sur ce type de principe. La mesure du débit peut aussi se baser sur l’intensité d’un courant électrique. Un champ magnétique est créé autour d’une section de la conduite, perpendiculairement à l’écoulement. L’eau qui passe à travers ce champ magnétique génère un courant induit proportionnel au débit. Le débitmètre magnétique, aussi nommé électromagnétique, en est un exemple. Un autre exemple de méthode de mesure du débit se base sur la fréquence ou la vitesse de transmission d’une onde sonore, comme dans le cas du débitmètre ultrasonique. Les débitmètres compatibles avec les installations à surface libre sont décrits à la section 3.3, alors que ceux pour les écoulements sous pression sont détaillés à la section 4.

Pour leur part, les compteurs peuvent mesurer les volumes d’eau en se basant sur la mesure de la vitesse de rotation d’une pièce mobile interne qui est proportionnelle à la vitesse de l’eau. C’est le cas des compteurs à turbine et à hélice. La mesure peut aussi se baser sur le comptage d’opérations de remplissage, comme pour les compteurs volumétriques à déplacement positif, ou sur le comptage d’alternances hydraulique, comme pour les compteurs électroniques statiques à oscillation fluidique. Ces équipements ne sont pas abordés dans le présent cahier.

2.7 INSTALLATIONS TYPES DE MESURE DU DÉBIT EN CONDUITE DÉCOUVERTE

Un système de mesure du débit en conduite découverte comprend généralement deux composantes, soit l'élément primaire et l'élément secondaire. De façon générale, l'élément primaire est un dispositif qui permet d'obtenir un débit instantané de l'écoulement qui y transite. Les canaux jaugeurs, tels que les canaux Parshall et Palmer-Bowlus, ou encore les déversoirs, sont des exemples d'éléments primaires.

Pour sa part, l'élément secondaire est un débitmètre qui permet de mesurer de façon continue le débit fourni par l'élément primaire par l'application d'une relation hauteur – débit connue. Il peut également totaliser et enregistrer les données de mesure du débit.

La section 3 décrit plus en détail les éléments primaires et secondaires ainsi que les particularités s'appliquant à ces installations en conduite découverte.

2.8 INSTALLATIONS TYPES DE MESURE DE DÉBIT EN CONDUITE FERMÉE SOUS PRESSION

Comme pour les installations de mesure de débit en conduite découverte, le système de mesure du débit en conduite fermée sous pression est généralement composé d'un élément primaire et d'un élément secondaire. L'élément primaire est la composante qui produit et mesure un signal proportionnel au débit qui sera extrait et converti en un signal de sortie normalisé par l'élément secondaire. L'élément primaire correspond au tube de mesurage, aux dispositifs servant à créer l'effet recherché (signal) et aux électrodes de mesurage du signal. L'élément secondaire correspond habituellement à l'appareil affichant et transmettant les données acquises.

L'enregistreur en continu du débitmètre est généralement intégré à l'appareil, quoiqu'il puisse aussi constituer un élément distinct relié à l'appareil de mesure. L'ajout d'un ordinateur à ce système permet une conservation à plus long terme des données et accroît les possibilités de traitement de celles-ci puisqu'il permet de recourir à des logiciels spécialisés.

La section 4 décrit plus en détail la mesure du débit en conduite fermée sous pression.

2.9 CRITÈRES DE SÉLECTION, D'INSTALLATION, D'ENTRETIEN, DE VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE ET D'ÉTALONNAGE DES ÉQUIPEMENTS DE MESURE

2.9.1 Sélection de l'équipement de mesure

Pour mesurer précisément le débit d'un effluent, il convient de choisir la méthode la plus appropriée. L'équipement de mesure doit être adapté au type d'installation de prélèvement, de transfert ou de rejet en place. Par exemple, un compteur d'eau ne s'installe que sur des conduites sous pression, alors que certains types de débitmètres sont appropriés aux canaux ouverts ou aux conduites sous pression. Par ailleurs, les conditions particulières prévalant au point de mesure seront déterminantes dans la sélection de l'équipement le plus approprié. Une caractérisation préliminaire *in situ* concernant les éléments suivants est donc nécessaire :

- Les caractéristiques de l'eau (les propriétés physicochimiques, la présence de matières en suspension, d'algues, de sédiments, etc.);
- Les caractéristiques de l'écoulement (vitesse, turbulence, pression, température,

- conductivité, etc.);
- Le mode d'écoulement (libre ou sous pression) ou de rejet effectué (en continu ou intermittent);
- L'intervalle de mesure des débits (déterminer les débits minimal, maximal et moyen);
- L'accès à l'équipement de mesure (pour l'entretien, la vérification de l'exactitude, l'ajustage et la lecture des données);
- Les conditions environnementales pouvant influencer le fonctionnement des équipements (ex. : neige, froid ou glace);
- Les contraintes d'installation (ex. : espace disponible, forme et dimension d'un canal ou d'une conduite, présence d'une source d'alimentation électrique, etc.);
- Les pertes de charge² acceptables (vérifier si la configuration de l'installation actuelle permet de tolérer la remontée du niveau d'eau en amont du canal, engendrée par l'installation d'un élément de mesure);
- La sensibilité requise pour la détection et la mesure de la variation du niveau de l'eau associée à une variation minimale de débit;
- L'exactitude de mesure désirée.

Étant donné le grand nombre d'appareils sur le marché et les multiples paramètres pouvant influer sur leur sélection, il est recommandé de laisser l'exercice de sélection de l'équipement de mesure aux soins d'une personne expérimentée. Au moment de l'achat, il faudra obtenir toute l'information nécessaire au fonctionnement et à l'entretien de l'équipement, de même que les certificats d'homologation et d'étalonnage. Cette documentation devra demeurer disponible pour consultation dans le cadre du programme d'entretien de l'équipement.

Dans le cas d'appareils construits sur place (ex. : seuils de déversoir), on devra s'assurer que le système de mesure du débit pourra être utilisé, entretenu, vérifié et ajusté adéquatement.

2.9.2 Installation, vérification de l'exactitude, ajustage, étalonnage et entretien Installation

L'installation d'un système de mesure doit se faire en conformité avec toutes les caractéristiques techniques et les exigences formulées par le fabricant, et devrait être confiée à du personnel qualifié et expérimenté. Il est préférable d'avoir 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.

Selon les risques qui auront été prédéterminés localement, les appareils de mesure devraient par exemple être protégés contre le feu, le gel, les décharges électriques, les altérations dues à de l'eau chaude ou à la vapeur ainsi que contre les risques de surchauffe, de coups de bâlier, de dommages physiques ou de vandalisme.

Le système de mesure doit être installé de façon à en permettre l'inspection, la vérification, l'ajustage ou l'étalonnage si requis. Par exemple, un canal jaugeur ne devrait pas être recouvert

² Les concepts de charge totale et de perte de charge sont décrits à l'annexe 2.

de façon permanente. Prévoir une conduite de contournement dans le cas d'une installation sur conduite fermée peut faciliter l'intervention s'il devient nécessaire d'enlever le débitmètre.

Vérification de l'exactitude, ajustage et étalonnage

L'annexe 1 permet de distinguer les différentes notions ainsi que le vocabulaire de métrologie en lien avec la vérification de l'exactitude et l'étalonnage.

Achat d'un élément primaire étalonné et mise en service

Lors de l'acquisition d'un élément primaire, un certificat d'étalonnage est fourni attestant son exactitude dans des conditions théoriques. Ces conditions d'étalonnage ne sont généralement pas les mêmes lors de l'installation *in situ*. Ainsi, la vérification de l'exactitude devient essentielle lors de la mise en service de tout système de mesure. Dans tous les cas, elle doit être faite sur place, dans les conditions normales d'écoulement et de fonctionnement du système de mesure et dans les plus brefs délais à la suite de l'installation.

On effectue cette vérification en comparant les résultats fournis par le système de mesure *in situ* avec ceux d'une méthode de vérification reconnue par le Ministère (ex. : méthode volumétrique, méthode d'exploration du champ des vitesses, méthode utilisant un appareil de référence, etc.). Ces méthodes sont décrites aux sections 7 à 11. Il est recommandé de confier la vérification de l'exactitude à du personnel qualifié et expérimenté.

Réétalonnage d'un élément primaire

Le réétalonnage d'un élément primaire est requis lorsque l'installation n'est pas conforme aux normes du fabricant, lorsqu'une détérioration des installations se produit (déformation, niveaux horizontal et vertical) ou lorsque la vérification de l'exactitude ne respecte pas l'écart maximal toléré. L'étalonnage consiste dans ce cas à déterminer, pour différentes hauteurs d'écoulement, la relation qui existe entre le débit et la hauteur d'eau (dans le cas d'une conduite découverte) ou les conditions d'écoulement (pour une conduite sous pression) mesurées dans l'élément primaire.

Cela permet d'établir une nouvelle relation empirique hauteur – débit (ou autre grandeur considérée en fonction du type d'équipement en place) pour toute l'étendue de mesure susceptible d'être utilisée par l'élément primaire.

L'étalonnage d'un élément primaire en conduite découverte s'effectue généralement *in situ*, alors que l'étalonnage d'un débitmètre sur une conduite sous pression (ex. : électromagnétique) est effectué sur un banc d'essai.

Ajustage et vérification de l'exactitude du système de mesure du débit

L'ajustage ainsi que la vérification de l'exactitude de l'élément primaire demeurent essentiels même après un étalonnage. D'autant plus que les conditions d'essai sur banc d'essai et *in situ* peuvent difficilement être identiques, ce qui peut induire une erreur à considérer.

La vérification de l'exactitude de l'élément secondaire s'effectue quant à elle par la

comparaison de la mesure de débit de l'appareil avec une mesure manuelle. Ces éléments sont détaillés à la section 3.3. La fréquence des vérifications varie selon les exigences à respecter (ex. : règlement). Sous réserve des exigences applicables qui ont préséance sur le présent document, il est recommandé de procéder annuellement à une vérification de l'exactitude de l'élément primaire à l'aide d'une autre méthode de référence reconnue par le Ministère et décrite aux sections 7 à 11.

Pour sa part, la vérification de l'exactitude de la mesure de l'élément secondaire faisant partie d'un système de mesure en conduite découverte est recommandée hebdomadairement, et lorsque requis, les ajustages doivent être apportés dans les plus brefs délais. L'élément secondaire sur une conduite fermée est plus difficile à distinguer de l'élément primaire. Aussi la vérification recommandée mensuellement est décrite à la section suivante portant sur l'entretien du système de mesure du débit.

La section 12 donne les précisions relatives au rapport à produire.

Entretien

Pour tous les éléments primaires de mesure, il est recommandé de procéder à une inspection et à un entretien périodique, minimalement une fois par mois ou plus selon les conditions d'écoulement (ex. : effluent comportant beaucoup de matières en suspension). Ces travaux d'entretien permettent d'augmenter la durée de vie de la structure et l'exactitude de la mesure ainsi que de réduire les coûts d'entretien ou de remplacement. Il est important que l'utilisateur se réfère aux recommandations du fabricant pour connaître les particularités d'entretien de l'appareil. Les points à vérifier et les travaux à effectuer sont par exemple :

- Conduite découverte :
 - Vérifier l'intégrité de la structure (ex. : niveaux longitudinal et transversal, bris, déformations, fissures, fuites, joints entre les différentes sections de l'installation, etc.);
 - Nettoyer toutes les sections de l'élément primaire (radier, parois, arête du déversoir), la conduite de raccordement, le puits de mesurage (stabilisation) ainsi que les canaux d'approche et d'évacuation, en vue d'éviter l'accumulation de sédiments, d'herbes, de limon, de débris ou de glace;
 - Éviter la croissance de végétation à la sortie du canal;
 - Vérifier les conditions d'écoulement et s'assurer que celui-ci est tranquille et bien distribué en tout temps;
 - En présence d'un élément secondaire, vérifier l'exactitude de la mesure de l'appareil et apporter les ajustages requis;
- Conduite fermée :
 - Vérifier les composantes électroniques (ex. : signaux de sortie de 4 à 20 mA, zéro de l'appareil, connecteurs);
 - Vérifier les tendances du débit par rapport à l'historique des débits observés lors des journées antérieures ou par rapport aux actions entreprises dans le procédé de production ou de traitement des eaux pour la période considérée. Un écart

inexpliqué dans les valeurs de débits mesurées peut être le signe d'un mauvais fonctionnement de l'appareil et il requiert alors une investigation dans le but d'en déterminer la cause et d'apporter les correctifs requis;

- Relever l'absence d'alarme ou de signal d'erreur du système électronique;
- Dans le cas d'un effluent chargé en matières en suspension, il peut être requis de procéder à un nettoyage, particulièrement si un équipement non optimal aux conditions a été choisi (ex. : installation d'un diaphragme pour un effluent très chargé en matières en suspension);
- Si des matériaux isolants sont déposés par le liquide conducteur sur les électrodes ou les parois du tube de mesure, un moyen de nettoyage mécanique, électrique ou chimique doit être prévu pour éliminer les dépôts (ex. : démontage des électrodes, racleur mécanique, électrolyse, etc.);
- Les appareils comportant des pièces mobiles sont plus à risque de se dégrader avec le temps et l'utilisation. Dans le cas de certains modèles, il est possible de retirer une partie de l'appareil (ex. : partie mécanique du débitmètre à roue à aubes) pour l'entretien ou le remplacement de la pièce, ou encore de modifier des capteurs défectueux.

Le programme d'entretien de l'élément secondaire (débitmètre) et celui du système de transmission des données seront détaillés à la section 3.3. Des exemples d'aide-mémoire à utiliser lors de l'inspection des éléments primaires sont présentés à l'annexe 3.

La mesure du débit...

S'appuie sur :



- Le volume, donc l'aire de la section de mesure
- La durée de la mesure
- La vitesse de l'écoulement

Elle est « **ponctuelle** » (estimation) ou « **directe en continu** ».

Elle varie selon le **type d'écoulement** « **à surface libre** » ou « **sous pression** ».

L'exactitude d'une installation est directement reliée :

- À la sélection de l'équipement de mesure approprié aux conditions *in situ*
- Au respect des conditions d'installation
- À l'entretien de l'équipement
- À la vérification de l'exactitude

3 INSTALLATIONS DE MESURE DANS UN ÉCOULEMENT À SURFACE LIBRE

3.1 CLASSIFICATION DES ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE

La mesure du débit dans les écoulements à surface libre se base généralement sur la relation hauteur – débit, qui dépend des conditions et du comportement hydraulique de l'écoulement. Dans le cas des écoulements à surface libre, la surface est en contact avec l'air ambiant, et donc soumise à une pression égale à la pression atmosphérique.

Pour procéder à des lectures de hauteurs d'eau dans des conditions d'écoulement appropriées et représentatives du débit, il est important de comprendre le comportement hydraulique d'un écoulement.

La Figure 6 présente une classification des écoulements à surface libre.

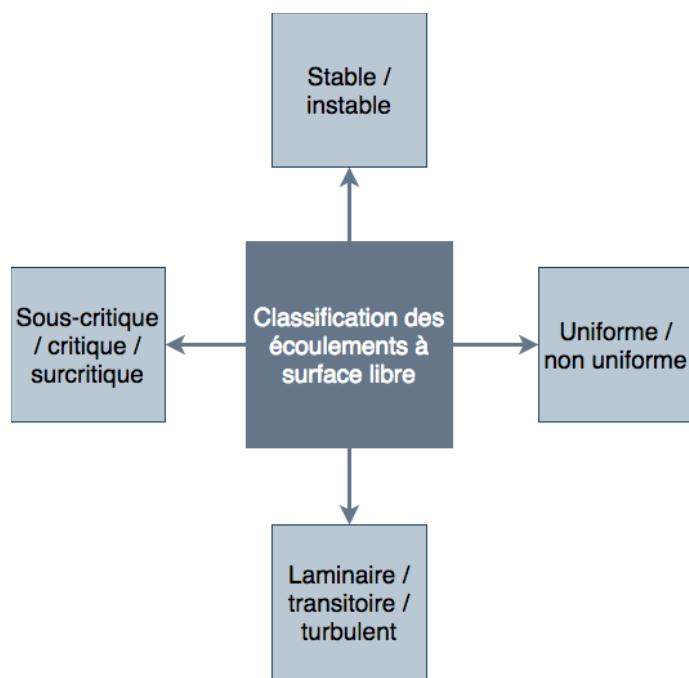


Figure 6 : Classification des écoulements à surface libre

3.1.1 Écoulements stable et instable

Il s'agit d'un critère de variabilité dans le temps. Un écoulement stable (aussi nommé permanent, stationnaire ou établi) est un état dans lequel les vitesses et la profondeur de l'écoulement ne varient pas en intensité dans le temps. Si les caractéristiques de l'écoulement dans une section du canal changent par rapport au temps, l'écoulement est alors instable (aussi nommé non permanent ou transitoire).

L'écoulement dans les canaux est rarement stable, bien que les variations temporelles puissent être suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régimes stables.

Un écoulement stable peut être uniforme ou non uniforme, alors qu'un écoulement instable ne peut être que non uniforme.

3.1.2 Écoulements uniforme et non uniforme

Il s'agit d'un critère de variabilité dans l'espace. Un écoulement uniforme est caractérisé par une hauteur d'eau et une vitesse constantes tout au long du canal. Cet état est possible uniquement dans un canal présentant une pente et une section transversale constantes. Ainsi, la ligne de la surface de l'écoulement et le radier du canal sont parallèles (Figure 7). Un écoulement véritablement uniforme dans un canal est plutôt rare. Il sera favorisé par un canal long et régulier.

Un écoulement non uniforme peut être accéléré ou décéléré selon l'augmentation ou la diminution de la vitesse de l'écoulement. Le mouvement peut varier graduellement (Figure 7, section B) ou rapidement (Figure 7, section C).

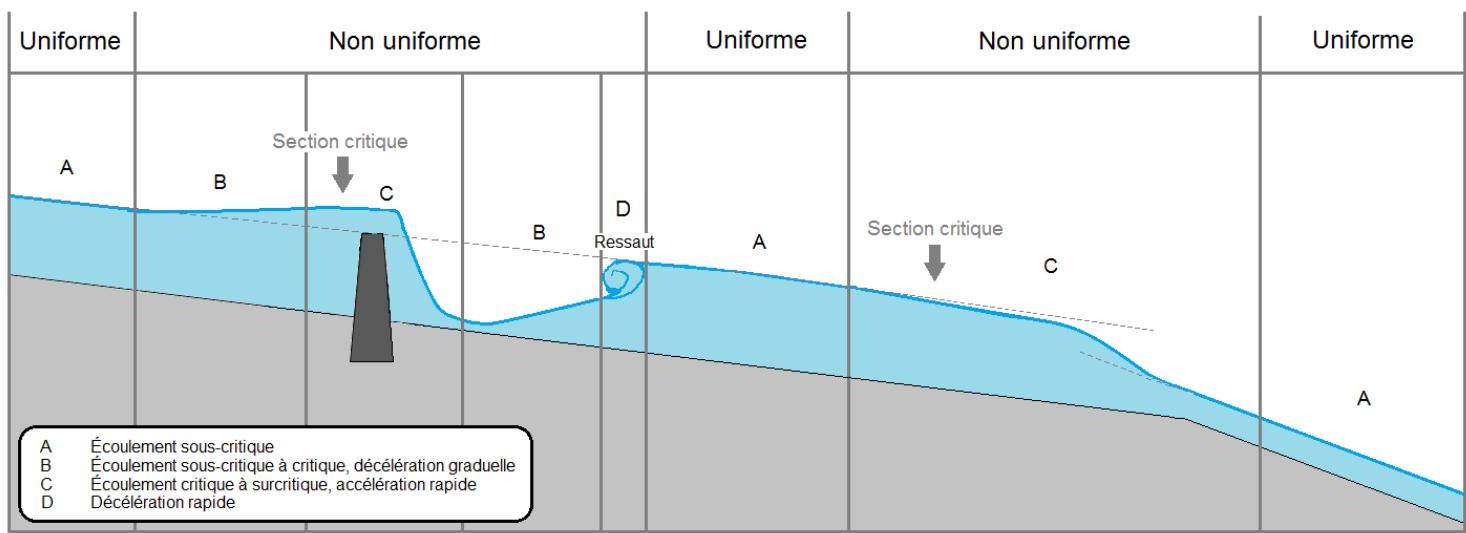


Figure 7 : Illustration d'un écoulement uniforme et non uniforme

3.1.3 Écoulements laminaire, transitoire et turbulent

Cette caractéristique se base sur un phénomène physique. Un écoulement laminaire est caractérisé par le déplacement en parallèle des filets d'eau qui le composent sans que ceux-ci se mélangent, contrairement à un écoulement turbulent (Figure 8). Des conditions laminaires sont exceptionnelles dans un cours d'eau et même dans un canal, où il existe généralement une certaine turbulence.

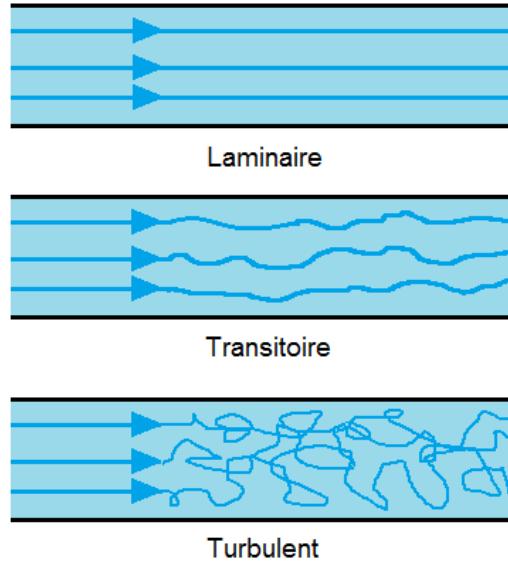


Figure 8 : Illustration des écoulements laminaire, transitoire et turbulent

C'est le calcul du nombre de Reynolds (R_e) qui permet d'établir la distinction entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent :

$$R_e = \frac{v_{moy} r_h}{\eta} \quad (10)$$

Où v_{moy} vitesse moyenne du liquide (m/s);
 r_h rayon hydraulique de la section transversale (m);
 η viscosité cinématique du liquide (m^2/s).

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension correspondant au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Plus ce nombre augmente, plus l'écoulement est turbulent. Il est à noter que le nombre de R_e est différent selon qu'il s'agit d'un écoulement à surface libre ou en charge.

En fonction des nombres de Reynolds croissants, trois régimes d'écoulement peuvent se distinguer :

1. Visuellement, le régime laminaire (Figure 8) présente une faible vitesse des particules du liquide ainsi que des lignes de courant bien identifiées et parallèles aux parois du canal. Dans ce cas, le nombre de $R_e < 500$. Les forces de viscosité déterminent l'écoulement. Le profil de vitesse se répartit de manière hyperbolique (illustré par les lignes rouges dans la Figure 9).

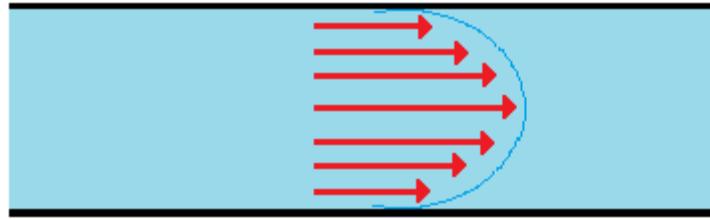


Figure 9 : Profil de vitesse d'un régime laminaire

2. Le régime transitoire (Figure 8) se traduit par l'apparition d'instabilités dues à l'amplification des perturbations. L'effet de la viscosité prépondérante dans le régime laminaire s'atténue. La transition entre les régimes laminaire et turbulent peut survenir lorsque le nombre de R_e varie entre 500 et 1 000.
3. Le régime turbulent se traduit par une augmentation des instabilités au point de donner naissance à un phénomène chaotique dans lequel il est difficile de voir une organisation (Figure 8). Dans ce cas, le nombre de $R_e > 1 000$. Le déplacement de tourbillons de tailles et de directions variées apparaît lorsque la vitesse est importante par rapport aux forces de viscosité.

La perte de charge survenant à ce régime est essentiellement due aux frottements visqueux entre les particules du liquide situées près des parois du canal (illustrés par les lignes rouges dans la Figure 10).



Figure 10 : Profil de vitesse d'un régime turbulent

3.1.4 Écoulements sous-critique, critique et surcritique

Cette caractéristique se base aussi sur un phénomène physique. Elle est évaluée au point de mesure de la hauteur d'eau et elle s'établit en fonction du nombre de Froude (Fr), qui met en relation la vitesse de l'écoulement et l'accélération due à la pesanteur et à la hauteur d'écoulement, selon l'équation suivante :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (11)$$

Où v vitesse de l'écoulement (m/s);
 g accélération due à la pesanteur (m/s^2);
 h hauteur de l'écoulement (m).

Comme son nom l'indique, l'écoulement sous-critique (aussi nommé fluvial ou subcritique) présente une vitesse inférieure à la vitesse critique. Cet écoulement se traduit par une faible vitesse, une hauteur d'eau élevée et un nombre de $Fr < 1$ (Figure 7, section A).

L'écoulement critique présente un nombre de $Fr = 1$ (Figure 7, section B). Il s'agit de l'énergie d'écoulement minimale pour un débit donné.

Dans un écoulement surcritique (aussi nommé torrentiel ou supercritique), le nombre de $Fr > 1$, l'écoulement est dominé par la gravité et il présente une forte vitesse ainsi qu'une faible hauteur (Figure 7, section C).

Le passage d'un écoulement sous-critique à surcritique s'observe par exemple dans le cas d'un ouvrage entraînant une restriction dans l'aire d'écoulement ou un changement de pente (ex. : canal jaugeur, déversoir).

Le passage d'un écoulement surcritique à sous-critique survient souvent lors d'un changement de pente, mais parfois aussi lorsqu'il y a contraction puis élargissement de l'écoulement. Il se caractérise par l'apparition d'un ressaut hydraulique (Figure 7, section C). Le ressaut hydraulique est une zone tourbillonnaire qui s'étend sur une certaine longueur et se caractérise par une variation brutale de hauteur d'eau.

3.2 ÉLÉMENTS PRIMAIRES

3.2.1 Généralités

Dans le cas d'une conduite découverte ou partiellement fermée dont l'écoulement ne se fait pas à sa capacité maximale (qui n'est donc pas sous pression), la mesure de débit est habituellement effectuée à l'aide d'une structure hydraulique appelée « élément primaire ».

L'élément primaire est un dispositif qui a pour fonction de modifier l'écoulement de l'eau de façon à créer des conditions d'écoulement particulières permettant à l'utilisateur d'obtenir un emplacement de mesure adéquat et fiable pour connaître le débit. La mesure du débit est donc effectuée au moyen d'une structure hydraulique qui permet d'établir une relation unique hauteur – débit. Le débit peut être ainsi obtenu à partir de la seule mesure de la hauteur d'eau réalisée au point de mesure de l'élément primaire.

L'un des principaux avantages de ce type d'installation comparativement à l'installation en conduite fermée est qu'il donne la possibilité de visualiser en tout temps les conditions d'écoulement. De cette façon, l'utilisateur est à même d'évaluer l'importance des mauvaises conditions pour les corriger le plus rapidement possible et permettre ainsi des mesures adéquates.

On divise en deux catégories principales les éléments primaires de mesure du débit en écoulement à surface libre, soit les canaux jaugeurs et les déversoirs. Chaque type de canal jaugeur et de déversoir est caractérisé par sa structure, sa forme et sa courbe hauteur – débit. On obtient le débit en se servant de la formule théorique ou de la table de débit appropriée qui est établie selon la forme et la dimension de la structure.

3.2.2 Critères de conception généraux et particularités d'installation des éléments primaires

Certains critères généraux doivent être considérés lors du choix et de l'installation d'un type d'élément primaire particulier. Dans un premier temps, ces structures doivent être suffisamment solides et résistantes à l'érosion pour faire face aux conditions d'écoulement et aux intempéries pouvant survenir à l'emplacement choisi. Les dimensions de l'élément primaire doivent aussi correspondre à l'intervalle de mesure du débit à mesurer, et l'installation doit être aménagée conformément aux recommandations du fabricant.

Dans le canal d'approche de l'élément primaire, il ne doit pas y avoir de branchement, de courbe, de chute ou de changement rapide du radier. L'écoulement à l'approche du point de mesure doit être bien réparti et relativement exempt de turbulences, de vagues et de tourbillons, alors que la partie située en aval de ce point doit permettre une évacuation libre, sans ressac et sans submersion. Les bords ou les fonds irréguliers dans le canal d'approche sont aussi à éviter puisqu'ils peuvent également contribuer à générer un profil d'écoulement irrégulier qui aura un effet néfaste sur l'exactitude de la mesure.

Il est à noter que, lorsque l'eau est chargée en sédiments ou matières en suspension, il est préférable d'utiliser un canal jaugeur, ce dernier retenant moins les dépôts de matières en suspension qu'un déversoir.

Finalement, l'emplacement choisi pour l'installation de ces structures doit être facile d'accès pour permettre la lecture *in situ* et la vérification de la courbe hauteur – débit, ainsi que l'inspection et l'entretien. En effet, l'inspection visuelle régulière de ce type d'installation est primordiale. Le confinement des installations sous des plaques d'acier ou de béton, limitant ainsi l'accès au seul point de mesure, constitue une installation inappropriée. On évitera donc d'installer un élément primaire dans un espace en limitant son accès. Les coûts relatifs aux vérifications de l'exactitude dans des conditions d'installation non optimales sont d'ailleurs à considérer. En effet, un canal d'approche non accessible ou situé en espace clos engendrera des frais importants pour la vérification de l'exactitude et des risques d'erreurs notables impliquant le recours à des méthodes de vérification plus délicates ou difficilement répétables.

Si l'emplacement ne permet pas l'installation d'un système de mesure du débit en conduite découverte, l'implantation d'une installation en conduite fermée est à envisager.

3.2.3 Point de mesure et puits de mesurage

Le point de mesure se situe où l'effet de rehaussement du niveau d'eau se produit, c'est-à-dire dans la partie élevée où la ligne de charge est observée dans l'ensemble de l'installation comprenant l'élément primaire, le canal d'approche et le canal de sortie (Figure 11). La ligne transversale à l'axe longitudinal de l'élément primaire, associée au point de mesure, constitue l'emplacement théorique de la mesure du débit. Il n'y a pas d'emplacement commun ou standard de ce point à travers les différents types d'éléments primaires. Chaque dispositif possède son propre emplacement de mesure. La conformité de l'emplacement du point de mesure du débit par rapport à l'élément primaire choisi est primordiale, car un emplacement inadéquat de ce point peut entraîner une diminution de l'exactitude de la mesure.

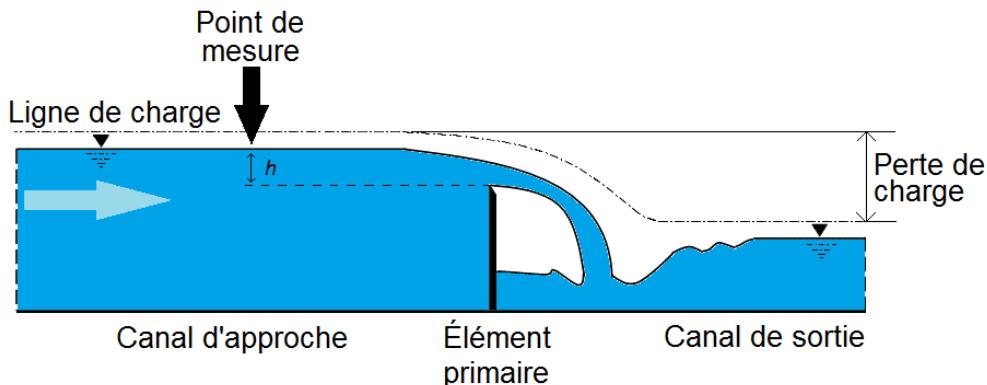


Figure 11 : Illustration de la ligne de charge et du point de mesure pour un déversoir

Idéalement, les éléments primaires de mesure devraient être munis d'un puits de mesurage (ou puits de stabilisation). Ce puits est situé au point de mesure de l'installation. Il permet à l'utilisateur de procéder à la mesure du niveau d'eau dans des conditions relativement calme, en reproduisant les conditions de niveau présentes dans l'élément primaire.

Ce puits est relié perpendiculairement à l'élément primaire à l'aide d'un conduit ou d'une fente dont l'ouverture équivaut à environ un dixième du diamètre du puits, ce qui permet une réponse rapide lors de changements de hauteur d'eau tout en amortissant les oscillations causées par les ondes superficielles.

Il est important de veiller à ce que le conduit arrive à angle droit avec les parois du puits et de l'élément primaire, autrement la mesure pourrait s'en trouver faussée. Ce puits doit aussi être de profondeur suffisante pour couvrir toute la gamme des niveaux d'eau. Le radier du puits doit se situer en dessous du niveau d'eau le plus bas à mesurer ou du zéro de l'élément primaire. Il est toutefois requis de soustraire la hauteur d'eau mesurée sous le niveau du radier du canal ou d'ajuster le zéro de la règle ou de l'appareil de mesure au niveau du plancher pour que le niveau d'eau ne soit pas surévalué.

Le diamètre du puits doit être suffisant pour en permettre l'utilisation et l'entretien sans causer d'interférences par rapport aux autres appareils de mesure en place, par exemple le détecteur de niveau d'un débitmètre. La vidange ainsi que le rinçage du puits permettent de le maintenir libre de sédiments ou de débris qui pourraient entraîner des mesures erronées.

Même si on utilise un puits de mesurage, une mesure manuelle effectuée directement dans le canal au niveau de la section de jaugeage est aussi recommandée à titre de contre-vérification. D'ailleurs, un limnimètre de référence (règle) doit être placé en permanence à ce point de mesure.

Bien que le puits de mesurage soit une solution intéressante, il convient de considérer que dans le cas d'un effluent contenant beaucoup de matières en suspension ou de débris, un entretien périodique (recommandé hebdomadairement) doit être effectué au puits de mesurage ainsi qu'au conduit qui le relie. De plus, lors de conditions climatiques hivernales, des adaptations sont nécessaires pour que l'eau ne gèle pas au niveau du conduit. Finalement, le puits de

mesurage doit être installé le plus près possible du canal pour qu'il n'y ait pas un décalage important qui traduirait inadéquatement les oscillations du niveau d'eau dans le canal. La Figure 12 illustre un exemple de puits de mesurage installé au point de mesure d'un canal Parshall.

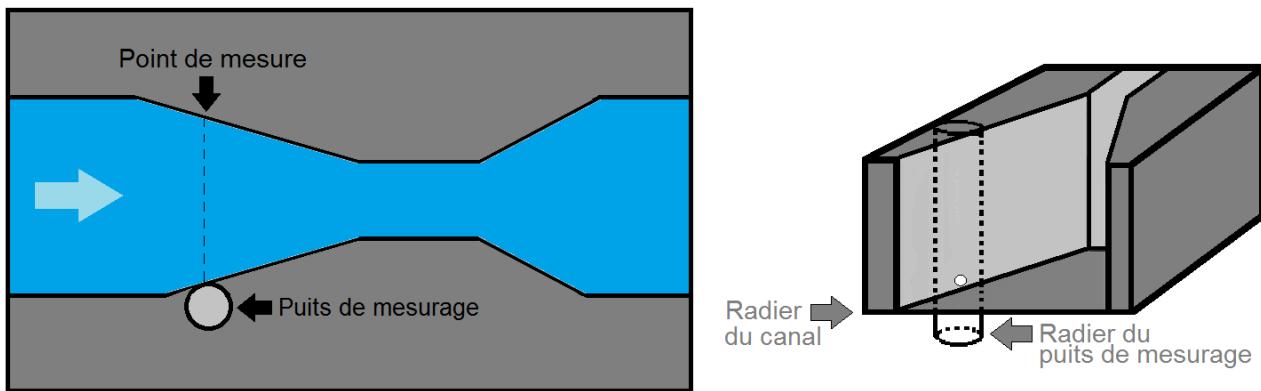


Figure 12 : Puits de mesurage d'un canal Parshall

3.2.4 Exactitude

La qualité et la configuration de l'installation de l'élément primaire, l'entretien apporté à celui-ci ainsi que les conditions d'écoulement existantes sont tous des facteurs pouvant influencer l'exactitude des mesures. Dans le but de maximiser l'exactitude des canaux jaugeurs et des déversoirs, les éléments suivants sont à considérer :

- Choisir un élément primaire dont les caractéristiques concordent avec les conditions du site, par exemple privilégier un canal jaugeur plutôt qu'un déversoir en présence d'un effluent chargé en sédiments;
- Installer un équipement de dimension appropriée aux conditions d'écoulement, c'est-à-dire dont la dimension sera suffisante pour permettre un écoulement libre à tous les régimes hydrauliques, selon les contraintes d'installation. Le dimensionnement doit être basé sur une étude ou des mesures récentes. L'objectif est de sélectionner un élément primaire qui couvrira la plus grande variation de hauteurs d'eau *in situ* au point de mesure ou un site offrant une grande stabilité de débit (ex. : installation à l'effluent d'un étang aéré plutôt qu'à l'affluent);
- Respecter les dimensions standard lors de la construction de l'élément primaire;
- Prendre les précautions nécessaires lors de son installation, par exemple :
 - S'assurer que la structure est au niveau transversalement et longitudinalement. Si la base du canal n'est pas au niveau par rapport à l'axe transversal, la hauteur moyenne doit être utilisée pour que la relation hauteur – débit soit conservée, c'est-à-dire que la hauteur doit être mesurée sur chacun des côtés du canal pour l'établissement de la hauteur moyenne;
 - Installer la structure hydraulique en ligne droite avec le canal d'approche dans le cas d'un canal jaugeur et perpendiculairement à l'écoulement dans le cas d'un déversoir;

- S'assurer lors de l'installation que la structure ne se déforme pas et qu'elle conserve ses dimensions et sa forme originales (ex. : éviter l'apparition du soulèvement du fond du canal, l'évasement des parois ou encore l'arrondissement de la crête d'un déversoir);
- Éviter la présence d'obstruction dans les différentes sections de l'élément primaire ainsi que dans les canaux d'approche et de sortie. En présence d'une obstruction, le liquide est forcé de passer par-dessus l'obstacle, ce qui augmente la hauteur du niveau d'eau au point de mesure et surévalue le débit;
- S'assurer que la structure est étanche pour que tout l'écoulement soit capté;
- S'assurer que la longueur d'approche est adéquate, car un canal d'approche trop court ne permet pas de corriger adéquatement toutes les distorsions importantes de vitesse d'approche et de distribution;
- Utiliser un étalon de travail conforme (ex. : règle);
- Respecter l'emplacement du point de mesure et du « zéro » de l'échelle pour la mesure de la hauteur d'eau;
- Respecter l'intervalle de mesure de l'élément primaire, car l'erreur de mesure augmente lorsque le débit est inférieur au débit minimal recommandé par le fabricant;
- S'assurer que l'augmentation du niveau d'eau est suffisante pour que se dégage clairement une relation hauteur – débit;
- S'assurer que l'installation permet d'obtenir un régime d'écoulement uniforme et constant en amont de l'élément primaire pour tout l'intervalle de mesure;
- Veiller à ce que la vitesse d'écoulement soit suffisante pour qu'il y ait un écoulement libre ou une ventilation;
 - Lorsqu'un canal fonctionne en écoulement noyé, l'exactitude de celui-ci diminue en fonction des conditions d'écoulement présentes en amont et en aval du canal, qui sont exprimées selon le rapport de submersion (h_2/h_1);
 - Il est important que l'utilisateur sache reconnaître et évaluer une installation fonctionnant en écoulement noyé;
 - Il est important d'adapter la technique de mesure en écoulement noyé (mesure en deux points);
- Entretenir de manière régulière l'installation pour enlever les dépôts de sédiments, d'herbes et d'autres débris qui s'accumulent en amont de la structure (ex. : canal d'approche, base amont d'un déversoir), dans les sections de contrôle (ex. : gorge d'un canal jaugeur, crête d'un déversoir) et à la sortie de l'installation;
- Inspecter régulièrement la structure pour s'assurer qu'elle ne présente pas de déformation ou de fissure qui causent des fuites;
- Utiliser adéquatement l'équation de débit et respecter les constantes.

Les erreurs de mesure des canaux jaugeurs et des déversoirs sont grandement influencées par la qualité de l'installation de l'élément primaire et par les conditions d'écoulement. De cette façon, les erreurs de mesure théoriques sont variables. En général, les marges d'erreur théoriques des éléments primaires sont de $\pm 3\%$ pour les canaux jaugeurs et de $\pm 2\%$ pour les déversoirs. Toutefois, l'expérience démontre qu'il est possible d'obtenir une erreur se situant

aux environs de $\pm 5\%$ lorsque l'installation est conforme aux recommandations du fabricant. Cette valeur augmente lorsque le débit est faible, ce qui se traduit par la diminution de l'exactitude de cette installation lorsque le débit se situe dans la limite inférieure de son étendue de mesure.

Dans un écoulement à surface libre...



La pression de l'interface air et eau = la pression atmosphérique.

L'écoulement est principalement influencé par la gravité.

Les caractéristiques de l'écoulement sont :

Variables dans le temps : stable / instable

Variables dans l'espace : uniforme / non uniforme

Fonction des phénomènes physiques :

Laminaire / transitoire / turbulent

Sous-critique / critique / surcritique

L'élément primaire (canal jaugeur ou déversoir) modifie l'écoulement de façon à créer une relation hauteur – débit précise, à la condition qu'il soit :

Adapté aux conditions *in situ*;

Installé conformément aux exigences;

Entretenu adéquatement

3.2.5 Canaux jaugeurs – Généralités

Les canaux jaugeurs sont généralement des éléments préfabriqués installés de façon temporaire ou permanente dans un écoulement. Il s'agit de structures hydrauliques spécialement moulées pour entraîner une restriction dans l'aire d'écoulement ou un changement de pente, de façon à provoquer un changement de régime hydraulique (sous-critique à surcritique) (Figure 13).

Si le débit du liquide est constant et que l'aire d'écoulement diminue, la vitesse de l'écoulement augmente nécessairement et amène une diminution de la hauteur d'eau. Il fonctionne donc selon le principe du Venturi.

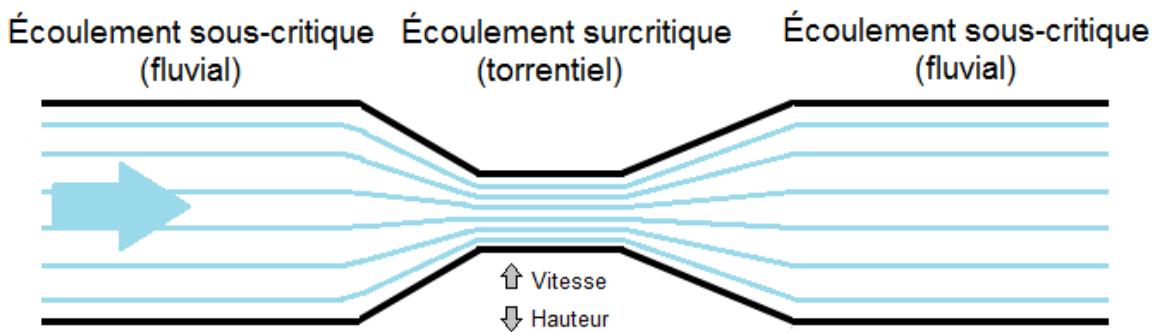


Figure 13 : Vue en plan d'un canal de type Venturi

Ces canaux possèdent généralement une section convergente, une section de contrôle (étranglement ou gorge) et une section de dérivation.

Le débit est établi par la mesure de la hauteur d'eau à un endroit précis dans le canal ou en amont de celui-ci, selon le cas. La hauteur d'eau qui traverse le canal est fonction du débit.

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.

Le choix du type de canal jaugeur dépend de plusieurs facteurs, dont l'intervalle de mesure des débits, l'écart maximal toléré, la perte de charge acceptable, le fait que l'écoulement entraîne ou non des sédiments ainsi que les facteurs économiques. Les canaux jaugeurs comportent certains avantages et désavantages, qui sont présentés dans le Tableau 1.

Les sections suivantes traitent des canaux jaugeurs les plus fréquemment rencontrés sur les sites de mesure permanents et temporaires. D'autres types de canaux jaugeurs peuvent être acceptables tant qu'ils correspondent aux conditions *in situ* et qu'ils sont installés et utilisés selon les recommandations du fabricant avec la bonne formule de conversion.

Tableau 1 : Avantages et désavantages des canaux jaugeurs

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> • Faibles pertes de charge; • Large intervalle de mesure des débits; • Vitesse d'écoulement en général suffisamment élevée pour empêcher la sédimentation; ils sont donc autonettoyants; • Lecture précise en écoulement libre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Installations généralement dispendieuses; • La mise en place demande un travail soigné; • Exige une base solide et étanche; • L'écoulement en amont et à l'entrée du canal doit être bien distribué et comporter peu de turbulences pour que les mesures obtenues soient représentatives; • La mesure du débit en écoulement noyé est ardue et non recommandée.

Les canaux jaugeurs...



Il s'agit de structures hydrauliques spécialement moulées pour entraîner une restriction dans l'aire d'écoulement ou un changement de pente, de façon à provoquer un changement de régime hydraulique (sous-critique à surcritique).

Q constant et \downarrow de l'aire d'écoulement = \uparrow vitesse et \downarrow hauteur d'eau.

Q est fonction de la hauteur d'eau au point de mesure.

Chaque type de canal jaugeur possède des dimensions standard et un point de mesure précis de la hauteur d'eau qui doit être respecté.

3.2.5.1 Canal Parshall

Le canal Parshall (ou canal jaugeur Parshall) a été conçu vers la fin des années 1920 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.

Description

Le canal Parshall comprend une section convergente, une section de contrôle (également nommée gorge, col ou étranglement) et une section de dérive (Figure 14). Ce type de canal offre une vaste gamme de largeurs d'étranglement allant de 0,0254 m (1 po) jusqu'à 15,2 m (50 pi) (Tableau 2).

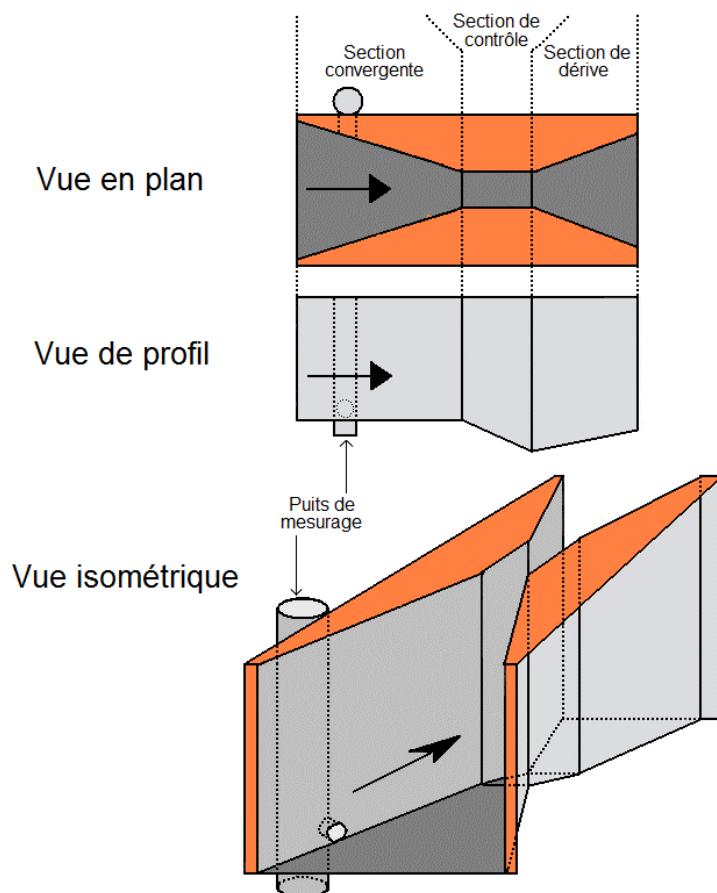


Figure 14 : Illustration d'un canal Parshall

La section convergente est caractérisée par un radier horizontal, tant dans le sens de la longueur que dans celui de la largeur, alors que les parois latérales verticales forment un entonnoir dirigé vers la section de contrôle.

Le fond de la section de contrôle est pour sa part incliné vers l'aval avec une pente de 3/8. Les parois latérales sont verticales et parallèles à l'axe longitudinal du canal. La ligne d'intersection

du radier de la section convergente avec le radier de la section de contrôle est appelée seuil du canal.

La section de dérive possède un fond incliné suivant une pente remontante de 1/6 ainsi que des parois latérales verticales divergentes.

Bien que ne faisant pas réellement partie du canal Parshall, les canaux d'approche et de sortie sont des éléments essentiels à considérer pour que l'installation fonctionne adéquatement en respectant l'écart maximal toléré.

Applications

Bien qu'il fût conçu pour mesurer le débit dans des canaux ouverts naturels tels les rivières, ruisseaux et fossés de drainage, le canal Parshall est fréquemment utilisé pour la mesure de débit dans des conduites découvertes fabriquées, tels que les réseaux pluviaux et domestiques, l'entrée ou la sortie des stations de traitement des eaux usées municipales ou industrielles, etc.

Par sa géométrie et son principe de fonctionnement, ce canal 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.

Principe de fonctionnement

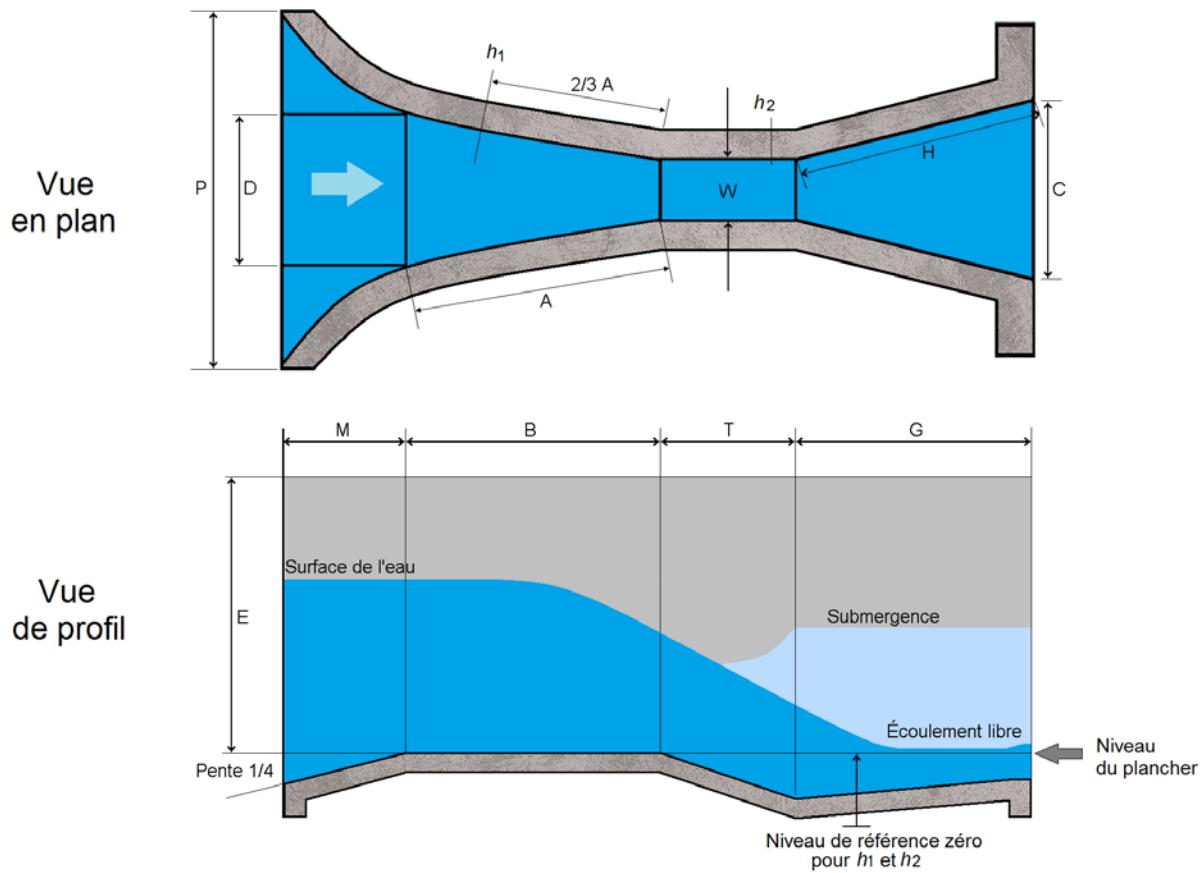
Ce type de canal fonctionne selon le principe du Venturi (Figure 13). En raison de ses restrictions latérales, le canal restreint l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle. L'abaissement soudain et important du niveau d'eau dans la section de contrôle est accompagné d'une augmentation de la vitesse d'écoulement.

On peut obtenir le débit en mesurant simplement la hauteur d'eau dans la section de mesurage (2/3A) du canal Parshall, puisqu'il est établi que la hauteur d'eau varie proportionnellement avec le débit lorsque les conditions d'écoulement sont standard.

Dimensions standard

Les dimensions de ce type de canal sont définies par la largeur de la section de contrôle (étranglement) identifiée par la lettre W dans les figures. La Figure 15 présente les caractéristiques physiques du canal et de l'écoulement et le Tableau 2, les dimensions standard pour chaque largeur de canal Parshall.

Il importe de respecter rigoureusement les dimensions standard si l'on veut utiliser les tables empiriques établies et obtenir des mesures de débit exactes. De plus, le canal doit être dimensionné de manière à ce qu'il fonctionne la majeure partie du temps dans une plage de débit allant de 20 % à 80 % de sa capacité. Un canal surdimensionné peut diminuer l'exactitude de la mesure à de faibles débits. Inversement, un canal sous-dimensionné peut aussi diminuer l'exactitude de la mesure lorsque les débits sont trop élevés. Il est donc préférable de ne pas utiliser un canal à l'extérieur de cette plage, car l'incertitude dans ces zones est importante.



Correspondance des lettres

Canal d'approche	M P	Longueur de la pente à l'entrée du canal Parshall Largeur du canal d'approche
Section convergente	D E A 2/3A h_1 B	Largeur de l'entrée de la section convergente Hauteur du canal à la section convergente Longueur de la paroi de la section convergente Longueur mesurée à partir de l'étranglement Hauteur d'eau en amont Longueur de la section convergente
Section de contrôle	T W h_2	Longueur de la section de contrôle Largeur de la section de contrôle (dimension du canal) Hauteur d'eau en aval
Section de dérive	C G H	Largeur de la sortie de la section de dérive Longueur de la section de dérive Longueur de la paroi de la section de dérive

Figure 15 : Caractéristiques physiques d'un canal Parshall et de l'écoulement

Tableau 2 : Dimensions standard (m) des canaux Parshall³

W		A	2/3A	B	C	D	E	G	H	M	P	T
m	po ('') / pi ('')											
0,0254	1"	0,363	0,242	0,356	0,0929	0,167	0,152 à 0,229	0,203	0,206			0,0762
0,0508	2"	0,414	0,276	0,406	0,135	0,214	0,152 à 0,254	0,254	0,257			0,114
0,0762	3"	0,467	0,311	0,457	0,178	0,259	0,305 à 0,457	0,305	0,309			0,152
0,152	6"	0,621	0,414	0,610	0,394	0,397	0,610	0,610		0,305	0,902	0,305
0,229	9"	0,879	0,587	0,864	0,381	0,575	0,762	0,457		0,305	1,08	0,305
0,305	12"	1,37	0,914	1,34	0,610	0,845	0,914	0,914		0,381	1,49	0,610
0,457	18"	1,45	0,965	1,42	0,762	1,03	0,914	0,914		0,381	1,68	0,610
0,610	2'	1,52	1,02	1,50	0,914	1,21	0,914	0,914		0,381	1,85	0,610
0,914	3'	1,68	1,12	1,64	1,22	1,57	0,914	0,914		0,381	2,22	0,610
1,22	4'	1,83	1,22	1,79	1,52	1,94	0,914	0,914		0,457	2,71	0,610
1,52	5'	1,98	1,32	1,94	1,83	2,30	0,914	0,914		0,457	3,08	0,610
1,83	6'	2,13	1,42	2,09	2,13	2,67	0,914	0,914		0,457	3,44	0,610
2,13	7'	2,29	1,52	2,24	2,44	3,03	0,914	0,914		0,457	3,81	0,610
2,44	8'	2,44	1,63	2,39	2,74	3,40	0,914	0,914		0,457	4,17	0,610
3,05	10'		1,83	4,27	3,66	4,76	1,22	1,83				0,914
3,66	12'		2,03	4,88	4,47	5,61	1,52	2,44				0,914
4,57	15'		2,34	7,62	5,59	7,62	1,83	3,05				1,22
6,10	20'		2,84	7,62	7,32	9,14	2,13	3,66				1,83
7,62	25'		3,35	7,62	8,94	10,7	2,13	3,96				1,83
9,14	30'		3,86	7,92	10,6	12,3	2,13	4,27				1,83
12,2	40'		4,88	8,23	13,8	15,5	2,13	4,88				1,83
15,2	50'		5,89	8,23	17,3	18,5	2,13	6,10				1,83

³ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook et openchannelflow.com.

Intervalle de mesure

Les canaux Parshall peuvent mesurer des débits variant de 22,7 m³/j pour un canal de 25 mm (1 po) jusqu'à 7 344 000 m³/j pour un canal de 15,2 m (50 pi). Le Tableau 3 présente les débits minimaux et maximaux recommandés pour différentes dimensions de ce type de canal en écoulement libre. Dans la présente section, seules les données s'appliquant aux canaux dont les dimensions se situent entre 0,0254 m (1 po) et 3,66 m (12 pi) ont été retenues.

Tableau 3 : Débits minimaux et maximaux recommandés pour les canaux Parshall en écoulement libre⁴

Dimension du canal		Hauteur minimale (h ₁) m	Débit minimal		Hauteur maximale (h ₁) m	Débit maximal	
m	po ('') / pi ('')		l/s	m ³ /h		l/s	m ³ /h
0,0254	1"	0,03	0,263	0,948	0,20	4,98	17,9
0,0508	2"	0,03	0,526	1,90	0,25	14,1	50,7
0,0762	3"	0,03	0,778	2,80	0,35	34,8	125
0,152	6"	0,03	1,50	5,39	0,45	108	389
0,229	9"	0,03	2,50	9,01	0,60	245	882
0,305	12"	0,03	3,32	12,0	0,75	446	1 605
0,457	18"	0,03	4,80	17,3	0,75	678	2 443
0,610	2'	0,045	11,7	42,0	0,75	915	3 293
0,914	3'	0,045	17,0	61,2	0,75	1 390	5 011
1,22	4'	0,06	34,9	125	0,75	1 876	6 750
1,52	5'	0,06	42,9	155	0,75	2 364	8 514
1,83	6'	0,075	72,6	261	0,75	2 857	10 290
2,44	8'	0,075	95,2	343	0,75	3 850	13 860
3,05	10'	0,09	158	570	0,85	5 754	20 720
3,66	12'	0,10	223	801	1,05	9 578	34 480

Conditions d'installation

Le canal Parshall doit être installé dans une section droite de la conduite et cette section doit être exempte d'obstacles et d'inégalités dans le fond. La présence d'objets dans le canal Parshall, par exemple des sondes de mesure, des tubulures ou des pompes, n'est pas recommandée.

Lors de la mise en place, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales du canal. Sa structure doit être rigide, étanche et capable de résister aux débits

⁴ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

maximaux sans être endommagée par des débordements ou par l'érosion aval. Une fondation solide contribue à éviter un déplacement de la structure ou l'apparition de déformations.

Le radier de la section convergente du canal doit être plus élevé que le radier de la conduite d'aménée. Ce dernier doit être relié au radier de la section convergente par une section à pente inversée ayant un rapport 1/4 (vertical/horizontal) (Figure 15).

L'installation d'un canal jaugeur Parshall doit être complétée par un canal d'approche et un canal de sortie. Le canal d'approche doit remplir les conditions suivantes :

- L'axe du canal Parshall doit être aligné dans la direction de l'écoulement du canal d'approche. Ce dernier doit être rectiligne et uniforme sur une longueur de cinq à dix fois la largeur de la surface de l'eau de la section « D » du Tableau 2. De plus, une conduite d'aménée ne doit pas être insérée dans la section convergente du canal (Figure 16);
- Le canal d'approche doit avoir une largeur minimale conforme à la dimension « D » du Tableau 2, et une largeur maximale n'excédant pas la dimension « P » du même tableau;
- Pour que l'écoulement ne soit pas perturbé à l'entrée de la section convergente du canal Parshall, la section convergente doit être raccordée au canal d'approche par des parois verticales, disposées selon un angle de 45° par rapport à l'axe du canal Parshall ou incurvées en plan selon un rayon supérieur à deux fois la hauteur maximale de l'écoulement;
- Cependant, pour ce qui est des canaux de petite taille (section de contrôle inférieure à 0,5 m de largeur), les parois de raccordement au canal d'approche peuvent être placées perpendiculairement à l'axe du canal. Toutefois, dans les canaux de plus de 0,5 m de largeur, mais de moins de 2,44 m, le raccordement du canal d'approche à la section convergente peut être arrondi (Figure 15, vue en plan), alors que pour les canaux de plus grande taille, il peut présenter des parois verticales orientées à 45° de l'axe;
- La surface du canal, la surface de la section de raccordement et celle du canal d'approche doivent être lisses;
- L'écoulement dans le canal d'approche doit avoir une répartition symétrique des vitesses, et la meilleure façon de réaliser cette condition est de prévoir un long canal d'approche rectiligne de section uniforme, libre de tout obstacle pouvant influencer les conditions d'écoulement. En cas de doutes sur les conditions d'écoulement et sur la symétrie de la répartition des vitesses dans le canal d'approche, une évaluation complète de la répartition et de la gamme des vitesses doit être réalisée. Cette évaluation peut se faire, par exemple, à l'aide de moulinets hydrométriques;
- L'écoulement dans le canal d'approche doit être non turbulent, sans tourbillons ou vagues, et cela pour accroître l'exactitude des mesures dans la section de mesurage du canal jaugeur;
- La pente, dans le canal d'approche, doit être inférieure à 1 %. Il importe d'éviter qu'une pente trop prononcée ne produise un ressaut dans la section convergente du canal, comme démontré à la Figure 17. Elle ne doit pas provoquer une trop grande

vitesse qui aurait pour effet de diminuer la remontée de la hauteur d'eau dans la section convergente. La pente du lit doit assurer un écoulement tranquille ou en régime fluvial. Ce régime est caractérisé principalement par un écoulement possédant une vitesse faible à modérée pour une grande profondeur d'eau.

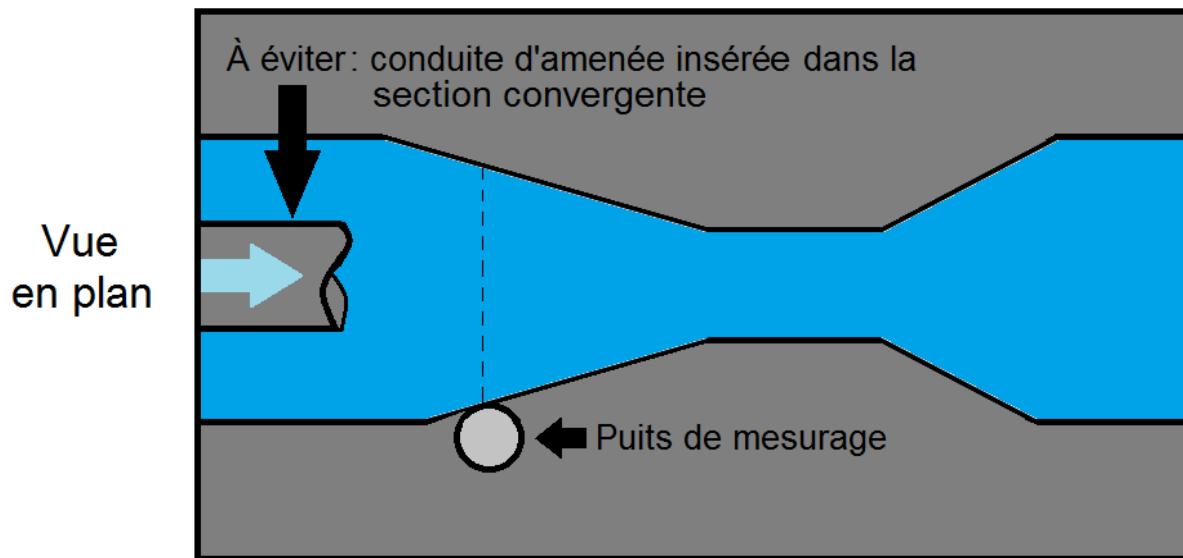


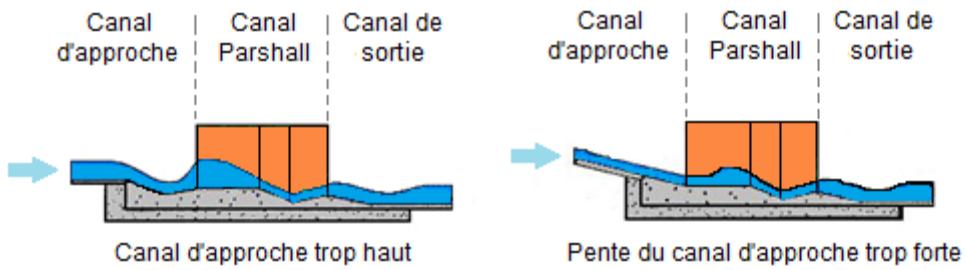
Figure 16 : Insertion du conduit d'amenée dans la section convergente – Méthode à éviter

Les conditions d'écoulement en aval de la structure sont importantes parce qu'elles contrôlent le niveau d'eau aval, qui peut influencer le fonctionnement du canal Parshall. Le canal de sortie doit remplir les conditions suivantes :

- La pente doit être suffisante pour permettre l'évacuation rapide de l'eau. Cette pente doit être au minimum de 2 %;
- Il doit être conçu de manière à ne pas pouvoir créer de restriction qui entraînerait un écoulement noyé du canal;
- Il ne doit y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement et causer un écoulement noyé;
- La section de dérive doit être généralement prolongée au moyen de parois verticales, et l'angle d'orientation de ces parois est supérieur à celui des parois de la dérive, dans le but de prévenir l'érosion provoquée par la chute d'eau.

Toutes les sections du canal doivent être aisément accessibles pour en permettre l'inspection et l'entretien courants. Une échelle limnimétrique devrait être installée en permanence sur une des parois de la section convergente, à l'emplacement de la section de mesurage (2/3A). Finalement, il est recommandé d'installer un puits de mesurage lorsque la mesure du niveau d'eau effectuée par l'appareil de mesure de niveau ou l'élément secondaire demande une meilleure exactitude.

Mauvaises installations du canal Parshall



Bonne installation du canal Parshall

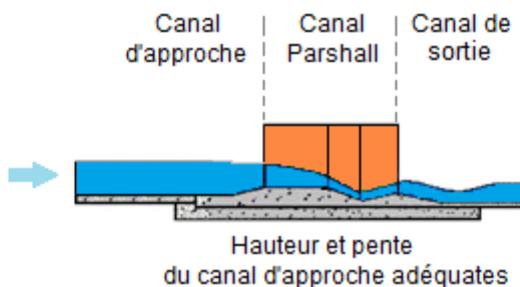


Figure 17 : Conditions d'installation du canal d'approche du canal Parshall

Point de mesure

Le débit traversant un canal est déterminé par le mesurage des hauteurs d'eau dans la section convergente (h_1) et dans la section de contrôle (h_2). La nécessité de mesurer l'une de ces hauteurs ou les deux dépend des conditions d'écoulement dans le canal.

En écoulement libre, seule la mesure de h_1 située aux deux tiers de la section A, distance mesurée le long de la paroi à partir du début de la section de contrôle, est requise. Cette mesure peut être effectuée à l'aide d'une échelle limnimétrique verticale placée au point de mesure de la hauteur d'eau, sur la face intérieure de la paroi. Le zéro de cette échelle doit correspondre au radier horizontal de la section convergente du canal. Toutefois, lorsqu'une plus grande exactitude est exigée ou lorsque les appareils utilisés sont des enregistreurs continus ou des capteurs de niveau, il doit être envisagé d'installer un puits de mesurage.

Si un canal est utilisé en écoulement noyé, il est nécessaire de mesurer deux hauteurs piézométriques, soit h_1 et h_2 . Le point de mesure de h_2 doit être situé dans la section de contrôle, à une hauteur correspondant au radier de la section convergente. En écoulement noyé, il n'est pas conseillé d'utiliser une échelle limnimétrique verticale pour mesurer h_2 , il faut plutôt prévoir un puits de mesurage puisque l'écoulement dans l'étranglement est turbulent et provoque des fluctuations considérables de la surface de l'eau.

Un puits de mesurage est une solution à considérer pour faciliter la lecture de la hauteur d'eau en présence de turbulences (voir section 3.2.3 pour plus d'informations sur l'installation du puits de mesurage).

Écoulement libre

L'écoulement dans un canal Parshall est considéré comme libre lorsqu'il n'est pas influencé par les variations du niveau d'eau en aval. Dans de bonnes conditions, la surface de l'eau de chacune des sections du canal apparaît lisse et sans ressaut hydraulique ou remous d'exhaussement.

Le canal Parshall fonctionne de façon satisfaisante avec un rapport de submersion élevé. Toutefois, lorsque la hauteur de l'eau en aval (h_2) (section de contrôle) 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 prise. La mesure du débit n'est pas faussée tant que le rapport h_2/h_1 exprimé en pourcentage n'excède pas les valeurs du Tableau 4.

Tableau 4 : Rapport de submersion (%) maximal en fonction des dimensions du canal Parshall

Dimensions du canal		Rapport de submersion
m	po/pi	%
0,025, 0,051 et 0,076	1, 2 et 3 po	50
0,152 et 0,229	6 et 9 po	60
0,305 à 2,438	1 à 8 pi	70
2,438 à 15,240	10 à 50 pi	80

Équation de débit en écoulement libre

En écoulement libre, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure (h_1). Ainsi, l'équation de débit résultant de la relation hauteur – débit, associée à un écoulement libre, s'exprime comme suit⁵ :

$$Q = K h^n \quad (12)$$

- Où Q débit, dont la valeur est fonction de l'unité de mesure choisie;
 h hauteur d'eau (m) (h_1);
 K constante, fonction de la dimension de l'étranglement et de l'unité de mesure choisie;
 n constante de l'exposant, dont la valeur est fonction de la dimension de l'étranglement (sans unité).

⁵ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

Le Tableau 5 présente les équations de débit pour les canaux Parshall en écoulement libre, pour des valeurs exprimées en litres par seconde (l/s) et en m^3 par heure (m^3/h).

Tableau 5 : Équations de débit des canaux Parshall en écoulement libre⁶

Dimension du canal (W)		Équation de débit	
m	po ('') / pi ('')	l/s	m^3/h
0,0254	1 ''	$Q = 60,36 h^{1,550}$	$Q = 217,3 h^{1,550}$
0,0508	2 ''	$Q = 120,7 h^{1,550}$	$Q = 434,6 h^{1,550}$
0,0762	3 ''	$Q = 176,5 h^{1,547}$	$Q = 635,5 h^{1,547}$
0,152	6 ''	$Q = 381,2 h^{1,580}$	$Q = 1 372 h^{1,580}$
0,229	9 ''	$Q = 535,4 h^{1,530}$	$Q = 1 927 h^{1,530}$
0,305	12 ''	$Q = 690,9 h^{1,522}$	$Q = 2 487 h^{1,522}$
0,457	18 ''	$Q = 1 056 h^{1,538}$	$Q = 3 803 h^{1,538}$
0,610	2'	$Q = 1 429 h^{1,550}$	$Q = 5 143 h^{1,550}$
0,914	3'	$Q = 2 184 h^{1,566}$	$Q = 7 863 h^{1,566}$
1,22	4'	$Q = 2 954 h^{1,578}$	$Q = 10 630 h^{1,578}$
1,52	5'	$Q = 3 732 h^{1,587}$	$Q = 13 440 h^{1,587}$
1,83	6'	$Q = 4 521 h^{1,595}$	$Q = 16 280 h^{1,595}$
2,44	8'	$Q = 6 115 h^{1,607}$	$Q = 22 010 h^{1,607}$
3,05 à 15,2	10' à 50'	$Q = (2 293 W + 473,8) h^{1,6}$	$Q = (8 255 W + 1 706) h^{1,6}$

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. En effet, comme décrit dans la section « Écoulement libre », le canal Parshall fonctionne malgré tout de façon satisfaisante avec un rapport de submersion élevé. Par contre, lorsque le débit est suffisant pour que l'écoulement en aval conditionne l'écoulement au droit du seuil, le seuil devient noyé. Visuellement, l'observation d'un ressaut hydraulique à la surface de l'écoulement dans l'étranglement indique que la mesure du rapport de submersion est requise. La submersion est illustrée en bleu pâle à la Figure 15.

L'écoulement est dit « noyé » lorsque le rapport de submersion h_2/h_1 est supérieur aux limites décrites dans le Tableau 4. Les conditions d'écoulement noyé altèrent l'exactitude des mesures du débit par rapport aux mesures en écoulement libre. Pour ces raisons, les tables de conversion

⁶ h correspond au point de mesure h_1 et est exprimé en mètres.

Source : Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

ne peuvent plus être utilisées pour connaître le débit, car le calcul de la relation hauteur – débit n'est plus adéquat. Des équations ont été précisément élaborées pour calculer le débit en écoulement noyé. Pour une même situation, différents résultats de débit peuvent être obtenus en fonction de l'équation choisie. Les résultats obtenus avec une telle équation devraient donc être corroborés à l'aide d'une autre méthode de mesure de débit (ex. : méthode volumétrique). Étant donné la difficulté d'application de ces équations, elles ne sont pas détaillées dans le présent document. Le lecteur peut se référer aux normes ISO appropriées pour obtenir davantage d'information.

Puisque le débit calculé est fonction de la mesure simultanée des deux hauteurs d'eau h_1 et h_2 , la mesure en continu implique l'installation de deux appareils de mesure, et la transmission de ces valeurs à un système informatique est nécessaire afin qu'elles soient intégrées dans l'équation de calcul du débit.

Le canal Parshall cesse de se comporter comme une structure de mesure de débit et devient inopérant lorsque le rapport de submersion h_2/h_1 atteint ou dépasse 95 %, car la différence de hauteur entre h_1 et h_2 est si faible que la moindre erreur de mesure de hauteur entraîne de grandes incertitudes. Pour toutes ces raisons, il est conseillé de bien choisir les dimensions du canal jaugeur de façon à éviter qu'il fonctionne en conditions d'écoulement noyé.

Modifications apportées au canal

Des modifications peuvent être apportées à la section de dérive sans que cela affecte les valeurs obtenues. Une version de ce canal, sans section de dérive, est également utilisée pour les canaux de 76 mm, 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, ce sujet n'est pas abordé en détail dans le présent document.

Le canal Parshall...



Constitué de 3 sections : convergente, de contrôle et de dérive.

Sa dimension correspond à la largeur de la section de contrôle, allant de 0,0254 m (1 po) jusqu'à 15,2 m (50 pi).

Devrait être dimensionné de manière à ce qu'il fonctionne la majeure partie du temps de 20 à 80 % de sa capacité.

Réaliser régulièrement une inspection du canal en se basant sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

3.2.5.2 Canal Palmer-Bowlus

Le canal Palmer-Bowlus a été conçu dans les années 1930 à la suite des investigations des ingénieurs Harold Palmer et Fred Bowlus visant à adapter un canal Venturi pour l'utilisation dans les égouts sanitaires. Le but était de créer un canal simple d'utilisation et à faible coût pouvant s'adapter facilement aux conduites rondes ou en U habituellement rencontrées.

Description

Ce canal comprend une section de contrôle (aussi nommée gorge ou étranglement) jumelée à deux sections de transition, soit une en amont et une en aval de la section de contrôle. Comparativement au canal Parshall, ces deux sections sont de formes identiques et sont placées à la même hauteur.

Sa forme permet de créer une restriction dans le canal et ainsi de produire une accélération de l'écoulement dans la section de contrôle (effet Venturi). La section de contrôle de ce canal est uniforme et d'une longueur équivalant au diamètre de la conduite de l'installation.

Peu importe sa taille, les dimensions d'un canal Palmer-Bowlus reposent uniquement sur le diamètre (D) de la conduite. Une fois le diamètre défini, les autres dimensions s'établissent de façon proportionnelle à celui-ci.

Différentes formes de restriction ont été conçues, mais la forme trapézoïdale est la plus utilisée, étant donné sa plus grande exactitude en conditions de faibles débits et de pointes de débits maximaux. Le présent document fait toujours référence à un canal de cette forme. Celui-ci est représenté à la Figure 18.

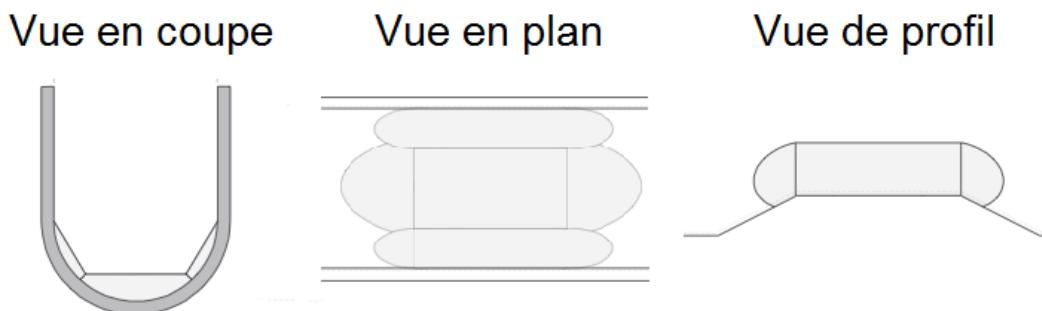


Figure 18 : Canal Palmer-Bowlus de forme trapézoïdale

Les canaux Palmer-Bowlus sont généralement préfabriqués en fibre de verre renforcé de plastique, en PVC ou en acier inoxydable, et ils sont disponibles dans des dimensions variant entre 0,102 m (4 po) et 1,83 m (72 po). Des canaux plus grands, jusqu'à 2,44 m (96 po), peuvent être manufacturés sur commande.

Contrairement aux canaux Parshall, une plus grande latitude de conception est permise dans le cas des canaux Palmer-Bowlus, impliquant une variété de dimensions et de configurations en fonction du manufacturier.

Selon les particularités de certaines conduites, différentes configurations de canaux ont été conçues. Par exemple, le canal d'approche peut être intégré à la structure préfabriquée pour remédier à une conduite mal définie qui n'offre pas de bonnes conditions d'approche. Le présent document se réfère au type d'installation sans section d'approche intégrée à la structure de fibre de verre. Ce type de canal permanent est habituellement coulé à l'aide de béton dans une conduite de dimensions similaires et présentant de bonnes conditions d'approche.

Applications

Ce type de canal est conçu pour mesurer le débit dans des réseaux d'égout et peut facilement être installé dans des conduites existantes. Il peut donc s'agir d'une option intéressante lorsque l'objectif est d'obtenir des mesures du débit localisées dans le réseau pour établir un bilan global. D'ailleurs, les canaux dont la taille est inférieure à 0,381 m peuvent être insérés dans un regard d'égout standard, sans qu'il soit nécessaire de modifier la configuration de l'installation existante.

Ainsi, il est souvent utilisé comme installation temporaire pour la récolte des données de débit qui serviront à la sélection de la dimension de l'élément primaire qui sera installé de façon permanente.

L'intervalle de mesure entre le débit minimal et le débit maximal est assez faible comparativement à celui d'autres types d'éléments primaires. Par exemple, pour un intervalle de mesure de débits donnés, le canal Parshall produit un meilleur changement de niveau d'eau que le Palmer-Bowlus, ce qui implique qu'un équipement de mesure du niveau plus sensible sera requis sur ce dernier.

Comme tous les canaux de mesure, sa géométrie et son principe de fonctionnement en font un bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides.

Principe de fonctionnement

L'élévation du plancher au niveau de la section de contrôle ainsi que la contraction verticale des parois latérales du canal diminuent l'aire de l'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle et une baisse du niveau d'eau dans la section de contrôle (gorge), accompagnée d'une augmentation de la vitesse d'écoulement.

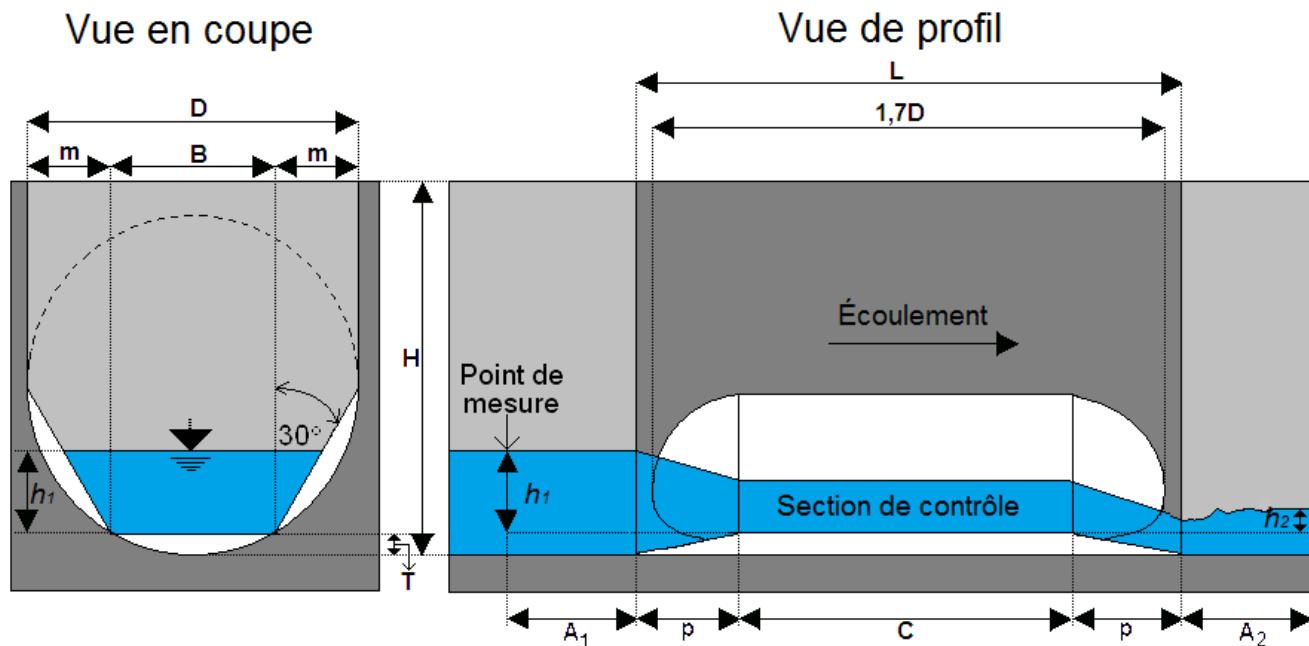
On obtient le débit en mesurant simplement la hauteur d'eau en amont du canal, puisqu'il est établi que la hauteur varie proportionnellement au débit.

Il est recommandé d'utiliser ce canal uniquement en écoulement libre. Les notions d'écoulements libre et noyé sont développées dans les sections subséquentes.

Dimensions standard

Les dimensions d'un canal Palmer-Bowlus dépendent du diamètre (D) de la conduite dans laquelle il est installé. Toutefois, pour favoriser l'exactitude de l'installation, la dimension du canal devrait être déterminée par le débit à mesurer plutôt que par le diamètre de la conduite existante. En effet, le choix d'un canal surdimensionné peut diminuer l'exactitude de la mesure

à de faibles débits, alors qu'un canal sous-dimensionné peut contribuer à un écoulement noyé. Ainsi, le canal devrait être dimensionné de manière à ce que l'écoulement maximal corresponde à environ 70 % de sa capacité maximale.



Correspondance des lettres

A₁	Longueur permettant de localiser le point de mesure h_1 ($D/2$)
A₂	Longueur permettant de localiser le point de mesure h_2 ($D/2$)
B	Largeur de la base de la section de contrôle du canal ($D/2$)
C	Longueur de la section de contrôle du canal (gorge) (correspond à la taille du canal)
D	Largeur du canal (correspond à la taille du canal)
H	Hauteur du canal ($D + 0,0508$ m environ) (ou 2 po environ)
L	Longueur totale de la base du canal ($2D + 0,0508$ m environ) (ou 2 po environ)
m	Distance entre la base et les côtés ($D/4$)
p	Longueur des sections d'entrée et de sortie ($D/2$)
T	Différence de hauteur entre la base de la section de contrôle du canal et le radier de la conduite ($D/6$) (correspond au zéro de référence de h_1 et de h_2)

Figure 19 : Canal Palmer-Bowlus – Plasti-Fab inc. en écoulement libre

Comme mentionné précédemment, les normes définissant les dimensions et la configuration de ce canal ne sont pas uniformes. Une grande latitude est ainsi permise lors de la construction du canal. Il importe donc d'utiliser les tables de débit fournies par le fabricant du canal pour obtenir un débit exact. La principale différence entre les manufacturiers réside dans la façon de traiter la contraction verticale des parois latérales de la gorge du canal.

Les canaux Palmer-Bowlus généralement rencontrés sur le marché québécois sont fabriqués selon les normes de la compagnie Plasti-Fab inc. La forme du canal et ses dimensions sont présentées à la Figure 19 et dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Dimensions standard (m) d'un canal Palmer-Bowlus selon Plasti-Fab inc.

C et D		B	H	T	A ₁ et A ₂	p	L	m
m	po							
0,102	4"	0,051	0,153	0,017	0,051	0,051	0,255	0,026
0,152	6"	0,076	0,203	0,025	0,076	0,076	0,355	0,038
0,203	8"	0,102	0,254	0,034	0,102	0,102	0,457	0,051
0,254	10"	0,127	0,305	0,042	0,127	0,127	0,559	0,064
0,305	12"	0,153	0,356	0,051	0,153	0,153	0,661	0,076
0,381	15"	0,191	0,432	0,064	0,191	0,191	0,813	0,095
0,457	18"	0,229	0,508	0,076	0,229	0,229	0,965	0,114
0,533	21"	0,267	0,584	0,089	0,267	0,267	1,117	0,133
0,610	24"	0,305	0,661	0,102	0,305	0,305	1,271	0,153
0,686	27"	0,343	0,737	0,114	0,343	0,343	1,423	0,172
0,762	30"	0,381	0,813	0,127	0,381	0,381	1,575	0,191
0,914	36"	0,457	0,965	0,152	0,457	0,457	1,879	0,229
1,067	42"	0,534	1,118	0,178	0,534	0,534	2,185	0,267
1,219	48"	0,610	1,270	0,203	0,610	0,610	2,489	0,305
1,524	60"	0,762	1,575	0,254	0,762	0,762	3,099	0,381

Intervalle de mesure

En fonction de leurs dimensions, les canaux Palmer-Bowlus peuvent s'adapter à un grand intervalle de mesure. Le Tableau 7 présente les hauteurs ainsi que les débits minimaux et maximaux recommandés pour un canal Palmer-Bowlus en écoulement libre. Les valeurs inscrites entre parenthèses représentent les maximums recommandés. Au-delà de ces valeurs, l'incertitude augmente.

Tableau 7 : Intervalles de hauteurs et de débits pour les canaux Palmer-Bowlus⁷

Dimension du canal (D)		Intervalles de mesure [hauteur]* MIN. – MAX.**		Intervalles de mesure [débit]* MIN. – MAX.**	
po	m	pi	m	CFS ⁸	m ³ /h
4	0,102	0,04 – 0,31 (0,25)	0,012 – 0,095 (0,076)	0,004 – 0,180 (0,121)	0,41 – 18 (12)
6	0,152	0,04 – 0,47 (0,35)	0,012 – 0,143 (0,107)	0,006 – 0,512 (0,295)	0,61 – 52 (30)
8	0,203	0,04 – 0,63 (0,50)	0,012 – 0,192 (0,152)	0,008 – 1,058 (0,690)	0,82 – 108 (70)
10	0,254	0,04 – 0,78 (0,60)	0,012 – 0,238 (0,183)	0,009 – 1,836 (1,119)	0,92 – 187 (114)
12	0,305	0,05 – 0,94 (0,70)	0,015 – 0,287 (0,213)	0,016 – 2,092 (1,676)	1,63 – 213 (171)
15	0,381	0,06 – 1,17 (0,90)	0,018 – 0,357 (0,274)	0,027 – 5,292 (3,086)	2,75 – 539 (315)
18	0,457	0,08 – 1,31 (1,05)	0,024 – 0,399 (0,320)	0,051 – 6,968 (4,614)	5,20 – 710 (470)
21	0,533	0,09 – 1,53 (1,25)	0,027 – 0,466 (0,381)	0,067 – 10,14 (7,043)	6,83 – 1 034 (718)
24	0,610	0,10 – 1,76 (1,40)	0,031 – 0,536 (0,427)	0,096 – 14,33 (9,465)	9,79 – 1 461 (965)
27	0,686	0,11 – 1,97 (1,60)	0,034 – 0,601 (0,488)	0,126 – 19,07 (13,09)	12,84 – 1 944 (1 334)
30	0,762	0,13 – 2,19 (1,75)	0,040 – 0,668 (0,533)	0,131 – 24,76 (16,52)	13,35 – 2 524 (1 684)
36	0,914	0,15 – 2,63 (2,01)	0,046 – 0,802 (0,613)	0,246 – 39,23 (17,28)	25,08 – 3 999 (1 762)
42	1,067	0,18 – 3,07 (2,45)	0,055 – 0,936 (0,747)	0,389 – 57,65 (38,34)	39,65 – 5 877 (3 908)
48	1,219	0,20 – 3,39 (2,80)	0,061 – 1,033 (0,853)	0,532 – 75,74 (53,54)	54,23 – 7 721 (5 458)
54	1,372	0,23 – 4,20 (3,14)	0,070 – 1,280 (0,957)	0,768 – 122,3 (70,36)	78,29 – 12 467 (7 173)
60	1,524	0,25 – 4,24 (3,50)	0,076 – 1,292 (1,067)	0,783 – 132,4 (93,51)	79,82 – 13 497 (9 532)
66	1,676	0,25 – 4,60 (3,85)	0,076 – 1,402 (1,174)	1,016 – 162,6 (116,5)	103,57 – 16 576 (11 876)
72	1,829	0,30 – 5,08 (4,20)	0,091 – 1,548 (1,280)	1,415 – 208,5 (147,6)	144,25 – 21 255 (15 046)

* Valeurs arrondies pour alléger la présentation du tableau.

**Les valeurs entre parenthèses représentent les hauteurs et débits maximaux recommandés. Au-delà de ces valeurs, l'incertitude augmente.

Conditions d'installation

Lors de la mise en place, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales du canal et de prévoir l'accessibilité à l'ensemble des sections pour l'inspection et l'entretien.

Le canal doit être installé à niveau longitudinalement et transversalement. Ce type de canal est généralement installé directement dans la conduite, préféablement au centre, et fixé solidement

⁷ Plasti-Fab, *Palmer-Bowlus flow equations* (www.plasti-fab.com).

⁸ Cubic foot/second.

au radier de ce dernier pour ne pas que des déformations apparaissent. La section de contrôle du canal est la partie la plus importante à protéger des déformations. Dans le cas d'installations temporaires, les canaux sont souvent intégrés à des barrages formés de sacs de sable. Le canal Palmer-Bowlus est relativement facile à installer puisqu'il ne nécessite aucun différentiel de radier en aval et en amont.

Au point de mesure, l'écoulement doit être calme et distribué uniformément. Aucune vague de surface ne doit être présente. Le fonctionnement du canal Palmer-Bowlus est optimal lorsque l'écoulement y est laminaire. À débit zéro, le niveau d'eau se trouve à la même hauteur que le radier de la section de contrôle. La mesure de la hauteur d'eau se fait à partir de ce niveau (D/6) et non à partir du fond de la conduite.

En vue d'optimiser les conditions d'écoulement et l'exactitude de la mesure, les caractéristiques suivantes à l'amont du canal sont à considérer lors de l'installation :

- Lorsque le canal est de dimension inférieure au diamètre de la conduite, il doit être équipé d'une section de transition dont la longueur est égale à au moins quatre fois le diamètre de la conduite dans laquelle il est installé. Idéalement, cette section de transition doit être reliée à la conduite par une section réductrice dont l'angle de réduction ne dépasse pas 30°;
- Dans le cas où la pente de la conduite est trop prononcée, il est possible de relever légèrement le canal pour réduire les effets de celle-ci (augmentation de la hauteur d'eau en amont du canal et diminution de la vitesse), à la condition que la conduite d'aménée 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 de la conduite (h_T);
- L'installation doit permettre un rehaussement du niveau d'eau en amont du canal, et ce rehaussement doit s'étendre sur une distance amont d'au moins dix fois le diamètre de la conduite;
- La présence de turbulences, d'obstruction, de coudes ou de jonctions doit être évitée dans le canal d'approche sur une longueur équivalant à au moins 25 fois le diamètre de la conduite d'aménée. L'écoulement dans le canal d'approche devrait être peu turbulent et bien distribué sur toute la largeur de l'écoulement;
- La pente du canal 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. Une pente excessive de la conduite amont entraîne une diminution de l'exactitude due à la turbulence créée au point de mesure;
- La pente du canal d'approche doit faire que l'écoulement n'est pas turbulent et que la vitesse d'écoulement en amont est inférieure à celle présente dans la section de contrôle. Dans le cas contraire, l'écoulement au point de mesure sera trop turbulent et ne permettra pas d'effectuer une mesure adéquate de la hauteur d'eau.

L'installation de ce canal doit aussi être complétée avec les éléments suivants à l'aval :

- Une pente prononcée de la conduite en aval n'est pas requise, bien qu'elle puisse contribuer à maintenir un écoulement en régime critique à travers la section de

- contrôle, et ainsi favoriser un écoulement libre à la sortie du canal;
- La pente de la conduite en aval du canal devrait être supérieure ou égale à la pente du canal d'approche;
 - La présence d'une courbe prononcée ou d'équipement à la sortie du canal est à éviter sur une distance équivalant à 5 à 20 fois la dimension du canal puisque cela est susceptible de restreindre l'écoulement et de contribuer à l'apparition d'un écoulement noyé.

Point de mesure

La localisation idéale du point de mesure de la hauteur d'eau se situe en amont de l'entrée du canal, à une distance équivalant à la moitié du diamètre de la conduite ($D/2$). Toutefois, cet emplacement peut varier légèrement pourvu que le point de mesure soit situé en avant de la section de transition amont et dans un segment où le niveau d'eau demeure relativement constant sur une distance équivalant à la largeur de la conduite.

Il est recommandé de prévoir une échelle limnimétrique installée en permanence sur une des parois au point de mesure, ce qui facilite la mesure instantanée de la hauteur d'eau ainsi que la vérification de l'exactitude du débitmètre lorsque requis.

La mesure s'effectue au centre du canal par rapport à l'axe transversal. Le mesurage de la hauteur d'eau se fait à partir du niveau correspondant au prolongement virtuel du niveau du radier de la section de contrôle du canal et non à partir du fond de la conduite elle-même. En effet, à un débit zéro, le niveau d'eau en amont du canal arrive à égalité avec le radier de la section de contrôle. La profondeur d'eau au point de mesure en conditions de débit zéro équivaut au sixième du diamètre de la conduite ($D/6$). L'ajustage de l'appareil de mesure de débit doit donc tenir compte de cette particularité. De façon pratique, il est courant de mesurer la hauteur d'eau à partir du radier de la conduite pour ensuite retrancher la valeur $D/6$ (théorique ou mesurée).

L'écoulement au point de mesure doit être parallèle aux parois et exempt de turbulences à la surface de l'eau. Dans le cas contraire, cela pourrait nuire à l'exactitude de la mesure de la hauteur.

Un puits de mesurage est une option à considérer pour éviter l'influence des turbulences de l'écoulement sur la mesure du niveau d'eau.

Écoulement libre

L'écoulement en amont du canal doit être tranquille, sans vagues, et doit présenter une vitesse inférieure à celle observable dans la section de contrôle. De plus, une légère augmentation du niveau d'eau en amont de la section de contrôle atteste que l'écoulement critique requis dans l'élément primaire est atteint.

L'eau doit s'écouler doucement dans le canal Palmer-Bowlus, sans présenter de turbulences marquées. De plus, le profil de surface doit s'abaisser tout au long de ce dernier. Si

d'importantes turbulences sont observées, des ajustages doivent être apportés à l'installation dans le but de tranquilliser l'écoulement.

En aval, un écoulement torrentiel est à privilégier. Pour maintenir un écoulement libre, il est donc fortement recommandé de prévoir une légère pente à la sortie de l'installation.

Équation de débit en écoulement libre

Les équations de débit utilisées varient légèrement en fonction de différentes sources. Il est recommandé de se référer aux tables de conversion ainsi qu'aux formules fournies par le fabricant du canal.

En écoulement libre, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure (h_1) selon le principe qui repose sur l'équation suivante⁹ :

$$Q = K h_1^n \quad (13)$$

Où Q débit (m^3/s ou l/s);
 n exposant en conditions d'écoulement libre (1,9);
 h_1 niveau d'eau au point de mesure (m);
 K coefficient en conditions d'écoulement libre (variable selon la dimension du canal).

Cette équation est basée sur la taille du canal et la hauteur de l'écoulement. C'est pour cette raison qu'il est requis d'utiliser les tables du fabricant.

À titre d'exemple, le Tableau 8 présente les équations de débit de la compagnie Plasti-Fab. Pour la plupart des grandeurs de canal Palmer-Bowlus, deux équations sont fournies par taille de canal. La formule courte permet d'obtenir un débit d'une exactitude acceptable se rapprochant des valeurs de la charte théorique. Toutefois, étant donnée la dérivation de l'exactitude aux extrémités supérieures et inférieures des courbes, il est recommandé d'appliquer la formule longue, qui offre une bonne exactitude à tous les niveaux de débit.

⁹ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

Tableau 8 : Équations de débit en écoulement libre – Plasti-Fab

Dimension		Équations courte et longue $Q = CFS \times 101,940648$ pour des m^3/h
po	m	
4	0,102	$Q = 1,73 \times (h + 0,00588)^{1,9573}$ $Q = -0,000491374 + 0,052219h + 1,815283h^2 - 3,352818h^3 + 7,682511h^4 + 79,0388h^5 + 113,3232h^6 - 2711,151h^7 + 5131,661h^8$
6	0,152	$Q = 2,071 \times (h + 0,005421)^{1,9025}$ $Q = -0,000252012 + 0,051932h + 2,872653h^2 - 5,988129h^3 + 5,207215h^4 + 69,2287h^5 - 89,3457h^6 - 348,922h^7 + 572,806h^8$
8	0,203	$Q = 2,537 \times (h + 0,01456)^{1,9724}$ $Q = -0,002211174 + 0,144056h + 2,644594h^2 - 2,468403h^3 + 1,537941h^4 + 18,920840h^5 + 4,9486h^6 - 123,611h^7 + 119,943h^8$
10	0,254	$Q = 2,843 \times (h + 0,01610)^{1,9530}$ $Q = -0,002568036 + 0,157007h + 3,717063h^2 - 7,279155h^3 + 12,957680h^4 + 10,044620h^5 - 30,7575h^6 - 3,989h^7 + 20,724h^8$
12	0,305	$Q = 3,142 \times (h + 0,017)^{1,9362}$ $Q = +0,001285249 + 0,160814h + 4,074878h^2 - 4,868885h^3 + 5,194802h^4 + 5,391436h^5 - 2,3493h^6 - 15,932h^7 + 11,682h^8$
15	0,381	$Q = 3,574 \times (h + 0,01682)^{1,9062}$ $Q = -0,005446241 + 0,321892h + 3,703519h^2 - 1,430430h^3 + 2,165814h^4 - 10,406070h^5 + 32,1713h^6 - 36,007h^7 + 13,225h^8$
18	0,457	$Q = 3,988 \times (h + 0,01875)^{1,8977}$ $Q = +0,010862620 + 0,005188h + 6,702144h^2 - 7,621502h^3 + 5,159058h^4 + 3,082969h^5 - 1,4116h^6 - 3,676h^7 + 1,957h^8$
21	0,533	$Q = 4,223 \times (h + 0,039)^{1,9619}$ $Q = -0,027504770 + 0,689056h + 4,144363h^2 - 1,761823h^3 + 1,672703h^4 - 0,342789h^5 + 1,6492h^6 - 2,110h^7 + 0,656h^8$
24	0,610	$Q = 4,574 \times (h + 0,0408)^{1,9497}$ $Q = -0,002225281 + 0,420895h + 5,930978h^2 - 3,470244h^3 + 0,746696h^4 + 3,182714h^5 - 2,1110h^6 + 0,058h^7 + 0,141h^8$
27	0,686	$Q = 4,97 \times (h + 0,038)^{1,9269}$ $Q = -0,009705140 + 0,354086h + 6,791781h^2 - 3,986792h^3 + 1,071059h^4 + 2,255546h^5 - 1,3530h^6 - 0,005h^7 + 0,084h^8$
30	0,762	$Q = 5,022 \times (h + 0,0625)^{1,9663}$ $Q = -0,200116800 + 2,238534h + 2,207354h^2 + 1,185735h^3 + 0,374370h^4 - 0,386049h^5 + 0,2800h^6 - 0,168h^7 + 0,033h^8$
36	0,914	$Q = 5,462 \times (h + 0,08)^{1,991}$ $Q = -0,084205270 + 1,359937h + 5,845147h^2 - 1,647873h^3 + 0,509795h^4 + 0,413952h^5 - 0,0570h^6 - 0,105h^7 + 0,0261h^8$
42	1,067	$Q = 6,12 \times (h + 0,078)^{1,9628}$ $Q = -0,083333500 + 1,431028h + 7,047561h^2 - 2,475667h^3 + 1,037684h^4 + 0,102303h^5 - 0,0446h^6 - 0,035h^7 + 0,008h^8$
48	1,219	$Q = 6,626 \times (h + 0,085)^{1,9586}$ $Q = -0,053395340 + 1,441452h + 7,813287h^2 - 2,012471h^3 + 0,265820h^4 + 0,384576h^5 - 0,0875h^6 - 0,020h^7 + 0,005h^8$
54	1,372	$Q = 7,210 \times (h + 0,08625)^{1,9450}$
60	1,524	$Q = 7,183 \times (h + 0,126)^{1,9833}$ $Q = -0,614242800 + 4,007510h + 6,591763h^2 - 1,186873h^3 + 0,318855h^4 + 0,215911h^5 - 0,0987h^6 + 0,012h^7 - 0,000h^8$
66	1,676	$Q = 8,536 \times (h + 0,07820)^{1,9100}$
72	1,829	$Q = 7,839 \times (h + 0,155)^{1,9871}$ $Q = -0,358481400 + 3,418848h + 8,675141h^2 - 1,269805h^3 + 0,156454h^4 + 0,085580h^5 - 0,0048h^6 - 0,005h^7 + 0,001h^8$

Écoulement noyé

L'écoulement noyé survient lorsque la résistance de l'écoulement à la sortie du canal entraîne une réduction de la vitesse et vient ainsi augmenter le niveau d'eau dans la section de contrôle et donc au point de mesure. L'écoulement noyé est toujours le résultat d'un problème en aval du canal, comme lorsque la conduite aval est plus élevée ou plus petite que le canal ou lorsque la conduite est obstruée.

Ce type d'installation doit être utilisé uniquement en écoulement libre. La mesure du débit demeure tout de même adéquate tant que le rapport de submersion (hauteur d'eau en aval / hauteur d'eau en amont ou h_2/h_1) est inférieur à 85 %, sinon le canal cesse de se comporter comme une structure de mesure de débit.

Lors de l'installation, toutes les précautions doivent être prises pour qu'une telle situation soit évitée. Il est donc conseillé de choisir les dimensions du canal jaugeur de façon à éviter qu'il ne fonctionne en conditions d'écoulement noyé.

Modifications apportées au canal

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

Le canal Palmer-Bowlus...



Bien adapté aux écoulements contenant des MES et entraîne une faible perte de charge.

Pour un même intervalle de débit, il produit un changement de niveau d'eau moins important que le canal Parshall.

Constitué d'une section de contrôle jumelée à deux sections de transition (amont et aval). La section de contrôle est d'une longueur équivalant au diamètre de la conduite et correspond à sa dimension (D) allant de 0,102 m (4 po) à 2,44 m (96 po).

La mesure de la hauteur d'eau est effectuée à partir du radier de la section de contrôle et non de celui de la conduite.

Devrait être dimensionné de manière à ce que l'écoulement maximal corresponde à environ 70 % de sa capacité maximale.

Réaliser régulièrement une inspection du canal basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

3.2.5.3 Canal en H (*H-flume*)

Le canal en H a été conçu vers le milieu des années 1930 par le Service de conservation des sols du département américain de l’Agriculture.

Description

Le canal en H résulte de la combinaison des caractéristiques physiques et mécaniques du déversoir et du canal jaugeur. Par sa forme, il ressemble plus à un déversoir triangulaire qu’à un canal. Du point de vue mécanique, il offre l’avantage d’évacuer les solides comme les canaux.

Ce type de canal est disponible en différents matériaux : aluminium, fibre de verre, acier galvanisé et acier inoxydable. Le choix du matériau est fonction des caractéristiques recherchées (ex. : un canal en aluminium offre l’avantage d’être léger et facile à déplacer, alors qu’un canal en acier inoxydable offre une bonne résistance à la corrosion et à l’abrasion) et du coût d’achat (ex. : le canal en aluminium est plus dispendieux).

Le canal en H est de trois types, soit les canaux HS, H et HL. Le type et la dimension des canaux découlent de la hauteur d’eau admissible au canal (section D du canal). Un canal de petites dimensions est du type HS, un canal standard, du type H et un canal de grandes dimensions, du type HL. Le canal HS présente une sortie plus restrictive pour augmenter l’exactitude de mesure des petits débits. Le canal HL est caractérisé par une ouverture légèrement plus large et il est à privilégier si le débit anticipé dépasse la capacité du canal en H standard.

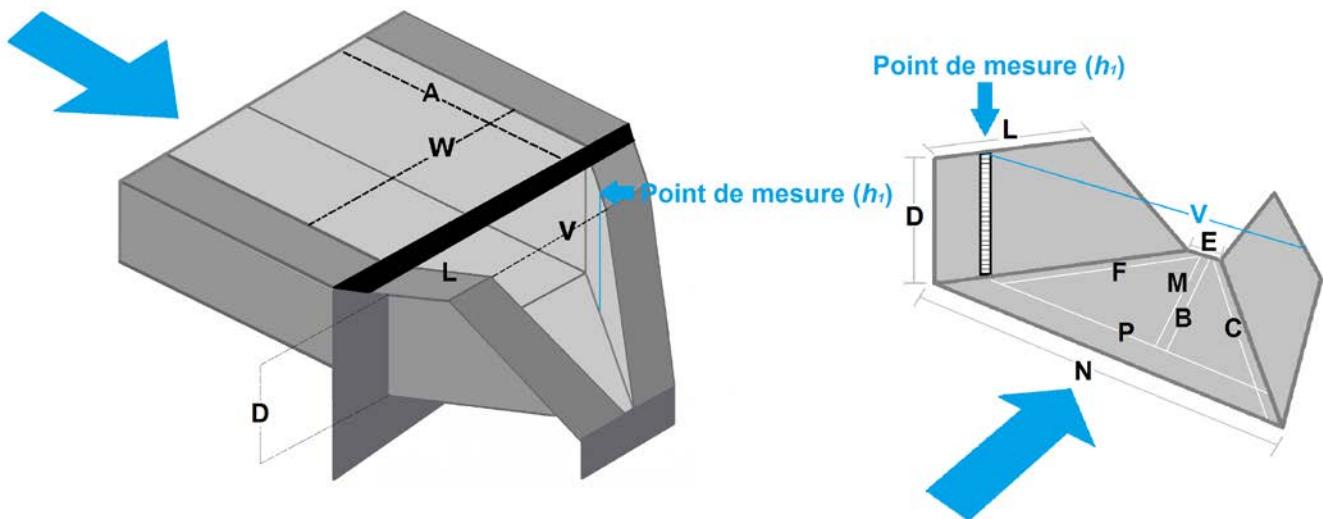
La description et l’identification des différentes sections du canal sont présentées à la Figure 20. Les sections demeurent les mêmes pour les trois types de canaux. L’identification des sections par des lettres a pour but de faciliter la compréhension et n’est pas basée sur une nomenclature normalisée.

Les Figure 22, Figure 23 et Figure 24 présentent les sections W et N comme étant de mêmes dimensions (1,05D pour un canal HS, 1,9D pour un canal en H et 3,2D pour un canal HL) puisque le canal d’approche est généralement de la même largeur que la largeur totale du canal, particulièrement lorsque le canal d’approche fait partie intégrante de la structure préfabriquée.

La section de dérive (divergente) est absente pour le canal en H, qui comprend seulement les sections d’approche (canal d’approche) et de contrôle (Figure 21). Le canal d’approche peut faire partie intégrante de la structure (ex. : le canal d’approche et la section de contrôle sont moulés en fibre de verre) ou être construit sur place (ex. : canal d’approche rectangulaire fait de béton qui est joint à la section de contrôle).

Le canal en H présente une entrée rectangulaire et une gorge en forme de V se rapprochant de l’échancrure d’un déversoir triangulaire.

L’assemblage des côtés forme une ouverture trapézoïdale, étroite à la base et large au sommet. Le fond du canal en H et du canal d’approche est plat, bien qu’un fond légèrement incliné puisse être possible pour faciliter l’évacuation des solides lorsque le débit est faible.



Correspondance des lettres

A	Longueur du canal d'approche
B	Longueur de la base du canal (dans l'axe du canal)
C	Longueur de la base du canal (par rapport à la paroi)
D	Hauteur du canal (correspond à la dimension du canal)
E	Largeur de la base de la section de contrôle, à la sortie du canal
F	Emplacement du point de mesure (par rapport à la paroi)
L	Longueur du sommet des parois
M	Emplacement du point de mesure (dans l'axe du canal)
N	Largeur totale du canal
P	Largeur de la base au point de mesure
V	Largeur de la section de contrôle à son sommet
W	Largeur du canal d'approche

Figure 20 : Illustration générale des différentes sections d'un canal en H

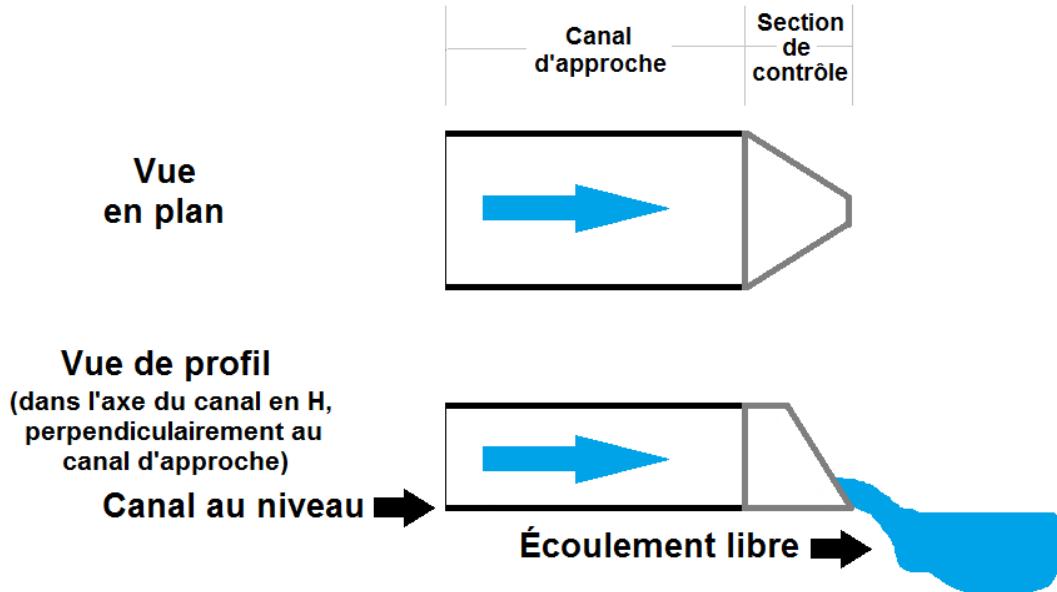


Figure 21 : Vue en plan et de profil du canal d'approche, de la section de contrôle et de la sortie du canal en H

Applications

Le canal en H permet de mesurer avec exactitude le débit d'effluents dont l'intervalle de mesure est très variable. La conception de ce canal permet donc la mesure d'un plus grand intervalle de débit que n'importe quel autre type de canal, offrant une grande sensibilité aux faibles débits en plus de la capacité de mesurer des débits élevés.

Il est fréquemment utilisé dans le domaine du traitement des eaux usées et pour mesurer, par exemple, des rejets de procédés industriels, des débordements de bassins de rétention et des effluents sanitaires ou d'eau de ruissellement.

La forme du fond du canal ainsi que la largeur de la base de la section de contrôle (E) à la sortie du canal permettent d'évacuer des effluents chargés en sédiments sans risque de colmatage. Cependant, il n'est généralement pas recommandé d'utiliser les canaux de plus petite taille (HS et H) sur des écoulements contenant des solides sanitaires ou des débris plus gros, car ceux-ci peuvent se loger à la sortie plus étroite du canal.

Le canal en H peut convenir à une installation temporaire de mesure si les particularités d'installation sont respectées.

Principe de fonctionnement

Le canal en H fonctionne selon le principe du Venturi. À cause de 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. On peut obtenir le débit en mesurant simplement la hauteur d'eau, puisque cette 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, car 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. Les notions d'écoulements libre et noyé sont développées dans les sections subséquentes.

Dimensions standard

Il n'y a pas de normes nationales ou internationales pour les canaux en H. Toutefois, pour que les tables hauteur – débit fournies par le fabricant du canal puissent être utilisées et que les mesures de débit soient exactes, il est nécessaire que les dimensions normatives de chacune des sections soient rigoureusement respectées lors de la fabrication du canal.

Les Figure 22, Figure 23 et Figure 24 présentent les dimensions de chacun des types de canaux (HS, H et HL), leurs caractéristiques physiques ainsi que les dimensions de chacune des sections de ces canaux. La signification des lettres des sections du canal est détaillée à la Figure 20.

Les dimensions de chacune des sections sont fonction de la valeur de D, qui correspond à la hauteur du canal. Par exemple, le canal HS offre quatre possibilités de dimension, soit 0,122 m, 0,183 m, 0,244 m et 0,305 m. On calcule donc la dimension de chacune des sections d'un canal HS de 0,305 m en remplaçant D par la valeur de 0,305 m. Par exemple, la section W de 1,05D devrait donc mesurer 0,3203 m ($W = 1,05D = 1,05 \times 0,305 \text{ m} = 0,3203 \text{ m}$), et ainsi de suite pour chacune des sections.

Bien que cinq dimensions de canaux HL soient offertes (0,610 m, 0,762 m, 0,914 m, 1,07 m et 1,219 m), seul le canal de 1,219 m est recommandé puisque les plus petits débits sont mesurés avec plus d'exactitude avec les canaux en H standard.

Le canal devrait être dimensionné de manière à ce qu'il fonctionne la majeure partie du temps dans une plage de débit correspondant à 70 % à 100 % de sa capacité. Un canal surdimensionné est donc à proscrire puisqu'il peut entraîner une baisse d'exactitude à de faibles débits.

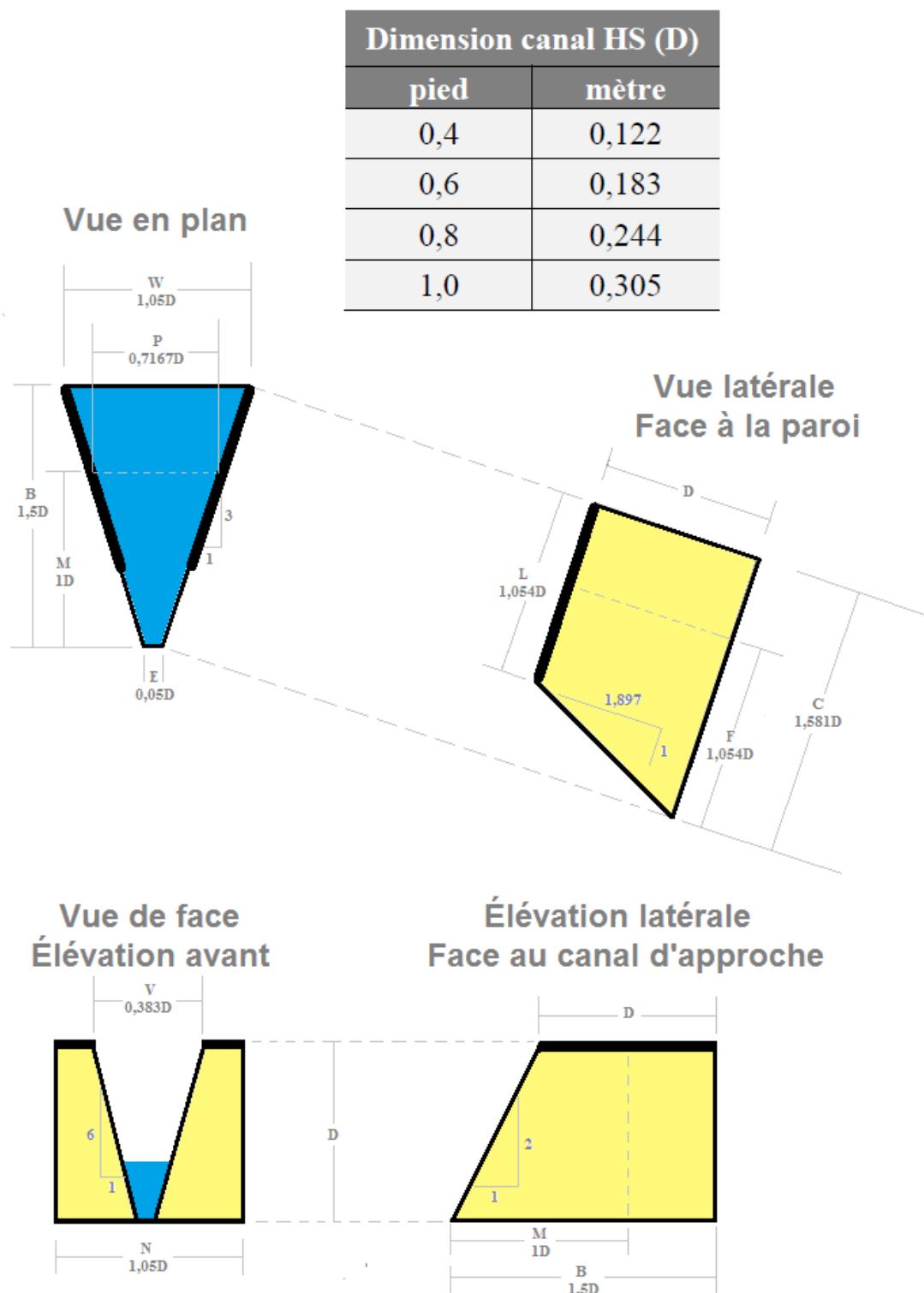


Figure 22 : Dimensions physiques d'un canal HS

Dimension canal H (D)	
pièds	mètre
0,5	0,152
0,75	0,229
1,0	0,305
1,5	0,457
2,0	0,610
2,5	0,762
3,0	0,914
4,5	1,37

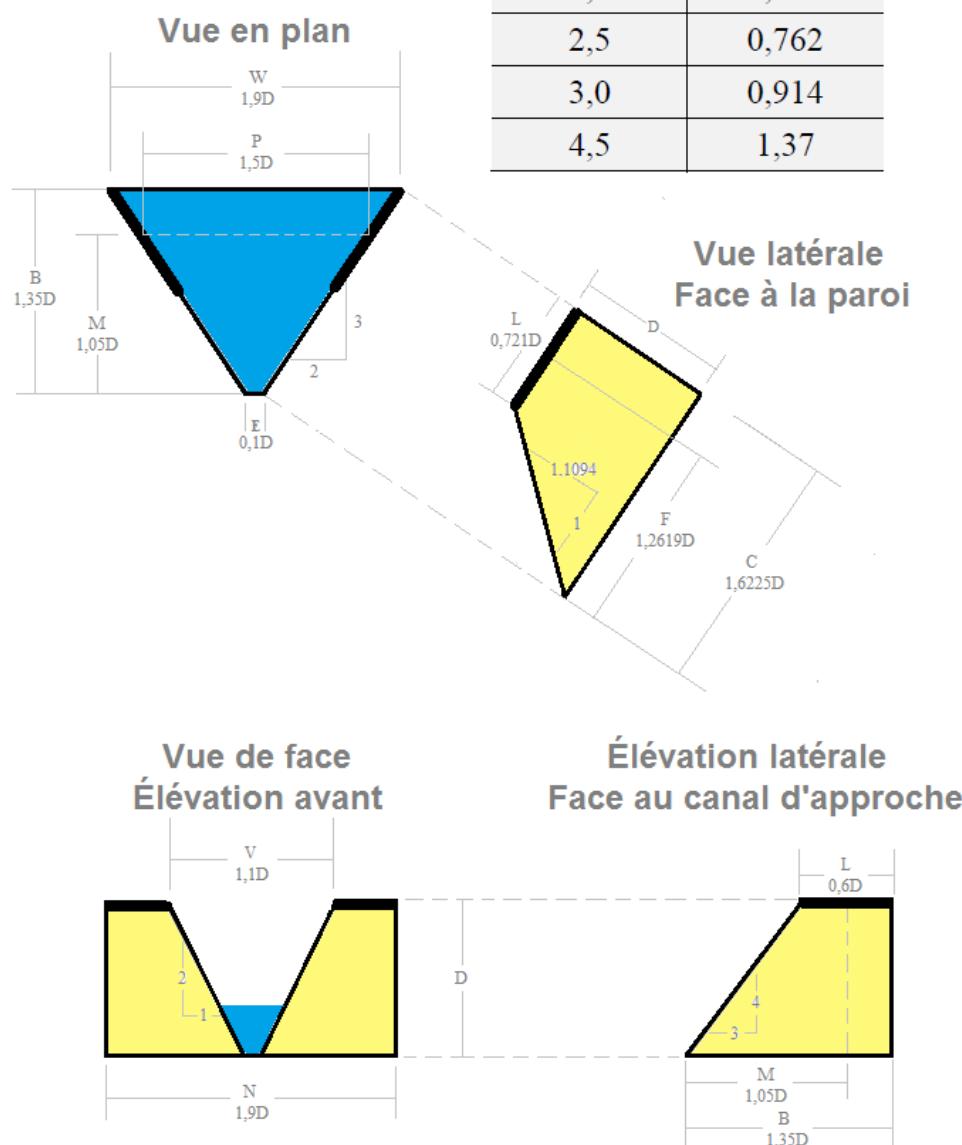


Figure 23 : Dimensions physiques d'un canal en H

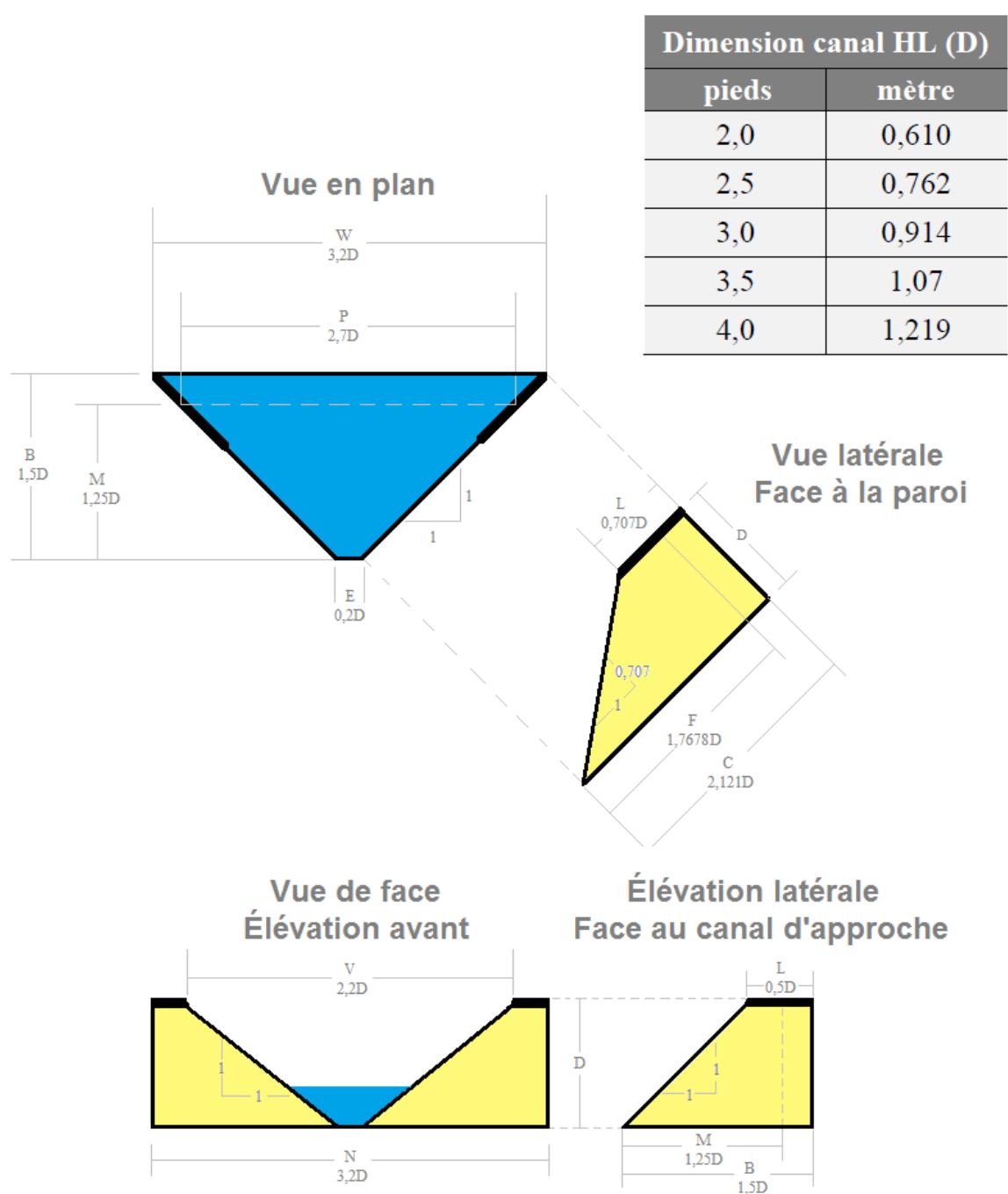


Figure 24 : Dimensions physiques d'un canal HL

Intervalle de mesure

Le Tableau 9 présente les hauteurs ainsi que les débits minimaux et maximaux recommandés pour les canaux HS, H et HL en écoulement libre.

Les trois types de canaux en H permettent de mesurer des débits variant entre $0,3216 \text{ m}^3/\text{jour}$ ($0,0134 \text{ m}^3/\text{h}$) pour un canal HS de $0,122 \text{ m}$ (0,4 pi) et $284\ 160 \text{ m}^3/\text{jour}$ ($11\ 8403 \text{ m}^3/\text{h}$) pour un canal HL de $1,219 \text{ m}$ (4 pi).

Seules les données se rapportant au canal HL de $1,219 \text{ m}$ sont présentées puisque les plus petits débits sont mesurés avec plus d'exactitude avec les canaux en H standard.

Tableau 9 : Débits minimaux et maximaux recommandés en écoulement libre pour chacune des dimensions de canaux HS, H et HL¹⁰

Dimension du canal (D)		Hauteur d'eau minimale	Débit minimal		Hauteur d'eau maximale	Débit maximal		
	mètre pieds	m	l/s	m^3/h	m	l/s	m^3/h	
HS	0,122	0,4	0,005	0,0037	0,0134	0,120	2,322	8,359
	0,183	0,6	0,005	0,0053	0,0190	0,180	6,268	22,56
	0,244	0,8	0,005	0,0070	0,0251	0,240	12,84	46,22
	0,305	1,0	0,005	0,0085	0,0307	0,300	22,44	80,77
H	0,152	0,5	0,005	0,0093	0,0334	0,150	9,465	34,07
	0,229	0,75	0,005	0,0139	0,0502	0,225	26,09	93,92
	0,305	1,0	0,005	0,0157	0,0567	0,300	53,52	192,7
	0,457	1,5	0,005	0,0250	0,0901	0,455	151,6	545,6
	0,610	2,0	0,005	0,0325	0,1170	0,605	308,9	1 112
	0,762	2,5	0,005	0,0418	0,1505	0,760	545,3	1 963
	0,914	3,0	0,005	0,0483	0,1737	0,910	856,5	3 083
	1,370	4,5	0,005	0,0715	0,2573	1,370	2 384	8 582
HL	1,219	4,0	0,005	0,1161	0,4180	1,215	3 289	11 840

Le Tableau 10 présente les débits (m^3/h) pour différentes hauteurs d'eau à partir de la hauteur d'eau minimale et selon différentes dimensions de canaux HS, H et HL.

¹⁰ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

Tableau 10 : Table de débit (m³/h) pour différentes hauteurs d'eau et dimensions de canaux HS, H et HL¹¹

Dimension du canal (D) (m)	Débit (m ³ /h)													
	HS				H									
	0,122	0,183	0,244	0,305	0,152	0,229	0,305	0,457	0,610	0,762	0,914	1,37	1,219	
Hauteur d'eau (m)	0,005	0,0134	0,0190	0,0251	0,0307	0,0334	0,0502	0,0567	0,0901	0,1170	0,1505	0,1737	0,2537	0,4180
	0,100	5,512	6,048	6,684	7,381	13,21	14,70	16,21	19,23	22,16	25,20	28,22	37,13	67,59
	0,150		14,93	16,05	17,29	34,07	36,34	39,19	44,74	50,18	55,71	61,25	77,67	140,7
	0,200			30,48	32,42		71,16	74,69	83,21	91,70	100,3	108,8	134,0	243,9
	0,250				53,42			125,4	136,6	148,8	160,1	172,3	208,0	377,2
	0,300				80,77			192,7	205,9	221,2	237,5	252,8	299,5	548,9
	0,350							294,4	312,8	332,2	351,5	410,5	752,8	
	0,400							403,1	422,5	447,0	470,6	543,0	993,0	
	0,450							531,0	555,4	581,5	610,1	696,3	1 276	
	0,500								710,6	738,1	771,8	872,7	1 601	
	0,550								888,4	920,4	956,1	1 075	1 966	
	0,600								1 090	1 130	1 160	1 301	2 382	
	0,650									1 360	1 401	1 552	2 851	
	0,700									1 623	1 664	1 827	3 362	
	0,750									1 907	1 957	2 131	3 925	
	0,800									2 282	2 455	4 533		
	0,850									2 626	2 818	5 202		
	0,900									3 004	3 207	5 934		
	0,950										3 638	6 719		
	1,000										4 098	7 544		
	1,050										4 590	8 442		
	1,100										5 120	9 418		
	1,150										5 677	10 450		
	1,200										6 274	11 520		
	1,250										6 912			
	1,300										7 581			
	1,350										8 281			

Conditions d'installation

Lors de la mise en place, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales du canal. La structure complète devrait être installée sur un support solide permettant d'éviter la déformation du radier et des parois à débits élevés.

Le canal en H doit être installé dans une section droite de la conduite découverte et le fond de cette section doit être exempt d'obstacles et d'inégalités (fond lisse). La présence d'objets dans

¹¹ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

le canal, par exemple des sondes de mesure, des tubulures ou des pompes, n'est pas recommandée.

Le canal doit être installé de façon centrée par rapport à l'écoulement.

Le canal d'approche est de forme rectangulaire et présente habituellement la même largeur (N) et la même hauteur (D) que l'entrée du canal en H. Pour les canaux plus larges que l'entrée du canal, un canal d'approche avec des parois latérales de 45° doit être utilisé pour diriger l'écoulement dans le canal. Le raccordement entre le canal en H et le canal d'approche doit être étanche et lisse.

Il importe d'éviter d'introduire une conduite d'amenée des eaux directement dans le canal d'approche ou dans la section de contrôle du canal (Figure 25).

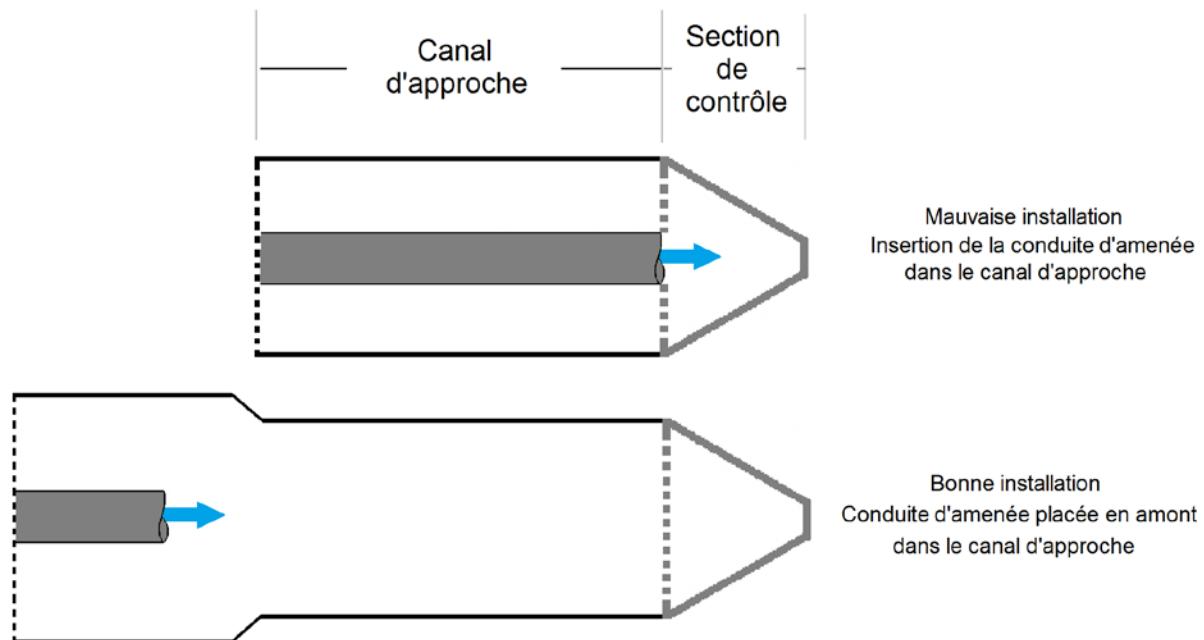


Figure 25 : Exemples d'installation d'une conduite d'amenée

Le canal d'approche doit être rectiligne sur une distance correspondant au moins à trois à cinq fois la dimension du canal (D), ce qui permet de réduire au minimum l'erreur de mesure associée à de mauvaises conditions d'écoulement.

Le radier du canal d'approche doit être de niveau. La pente de la section d'approche doit être inférieure à 1 %. Une pente trop prononcée qui produirait un ressaut dans la section de contrôle du canal (Figure 17) ou qui provoquerait une trop grande vitesse ayant pour effet d'amoindrir la remontée de la hauteur d'eau dans la section de contrôle est à éviter.

L'écoulement dans le canal d'approche doit être tranquille, sous-critique et réparti de façon uniforme sans écoulement préférentiel.

Si des déflecteurs sont utilisés pour corriger ou adoucir le débit, ils doivent être placés en amont du canal à une distance d'au moins dix fois la hauteur d'eau maximale. Les déflecteurs ne sont toutefois pas recommandés pour les écoulements chargés de solides sanitaires ou de débris.

À la sortie du canal, il ne doit y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement, celui-ci devant se faire librement (chute) et sans refoulement pour que n'apparaissent pas des conditions noyées. La pente de la conduite d'évacuation doit être suffisante pour permettre l'écoulement immédiat de l'eau. Cette pente devrait être d'au moins 2 %.

L'emplacement du point de mesure (F et M) doit respecter les exigences décrites par le fabricant (ex. : Figure 22, Figure 23 et Figure 24), car le canal en H est très sensible aux légères erreurs dans la position du point de mesure.

Toutes les sections du canal doivent être aisément accessibles pour l'inspection et l'entretien courants. Une échelle limnimétrique doit être installée en permanence sur une des parois de la section de contrôle, à l'emplacement du point de mesure de la hauteur d'eau. Finalement, il est recommandé d'installer un puits de mesurage lorsque la mesure du niveau d'eau effectuée par l'élément secondaire demande une meilleure exactitude.

Point de mesure

Le point de mesure (h_1) est situé dans la section de contrôle du canal de mesure (Figure 20 et Figure 26) et est fonction de la hauteur d'eau maximale admissible au canal (D). L'emplacement du point de mesure est variable selon le type de canal en H comme le démontrent les Figure 22 (HS), Figure 23 (H) et Figure 24 (HL). On peut déterminer l'emplacement du point de mesure (h_1) en mesurant la distance de la section M à partir de la sortie du canal (E), ou encore en fonction de la différence entre les sections B et M mesurées à partir de l'entrée de la section de contrôle (N) (Figure 26).

L'appareil de mesure en continu (élément secondaire) du canal en H devrait être installé soit directement au-dessus de l'écoulement dans le canal, soit dans un puits de mesurage qui y est relié.

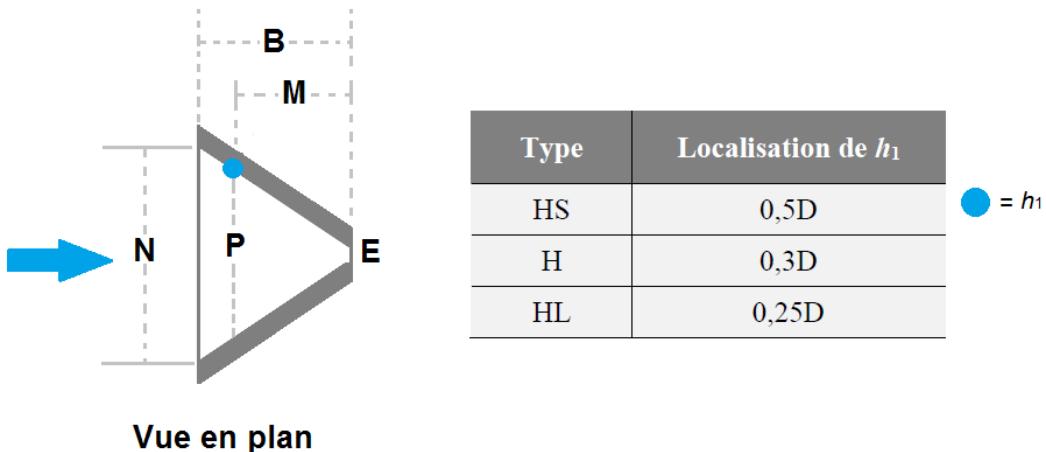


Figure 26 : Localisation du point de mesure en fonction du type de canal en H

Écoulement libre

À cause de leur section de contrôle restreinte et de l'absence d'une section de dérive, les canaux HS, H et HL sont facilement influencés par les effets de la submersion.

Pour qu'un canal en H fonctionne comme prévu, l'écoulement du canal doit être libre et non limité par les conditions en aval. Lorsque la résistance en aval augmente au-dessus d'un certain point et que la vitesse en amont dans le canal est réduite, un effet de retour d'eau est créé. Le ralentissement de l'écoulement peut évoluer jusqu'à la stagnation complète de l'écoulement où l'élément primaire ne fonctionne plus comme une structure hydraulique.

La mesure du débit demeure toutefois possible lorsque l'écoulement dans le canal se trouve dans un état transitoire se situant entre l'écoulement libre et l'écoulement noyé. Il est possible d'évaluer cette situation grâce au calcul du rapport de submersion (profondeur d'eau aval h_2 / profondeur d'eau au point de mesure principal h_1) (Figure 27).

Le rapport de submersion d'un canal en H est inférieur comparativement à d'autres canaux capables de transporter des débits du même ordre de grandeur. Le rapport de submersion exprimé en pourcentage est de 25 % pour les types HS et H, et de 30 % pour le type HL.

Même si une installation a été conçue à l'origine pour fonctionner en écoulement libre, des changements dans l'écoulement aval peuvent causer des conditions de submersion, par exemple la croissance de la végétation en aval de l'installation, le dépôt de sédiments, les structures hydrauliques ajoutées, la reconfiguration de l'installation ou l'augmentation du débit.

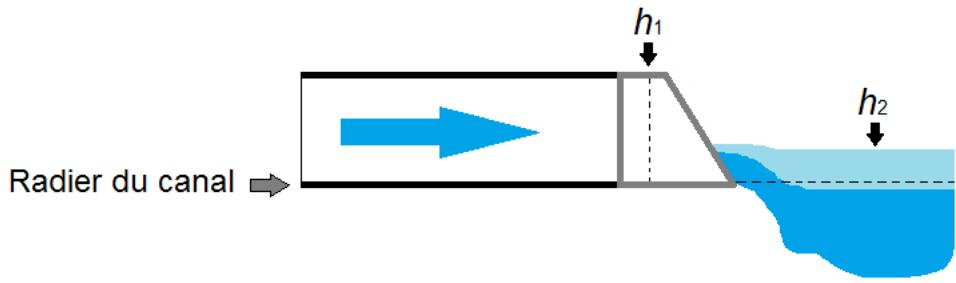


Figure 27 : Localisation des mesures de hauteur d'eau h_1 et h_2

Équation de débit en écoulement libre

L'équation de débit simplifiée conçue par BOS permet de déterminer le débit pour les trois types de canaux en H et prend la forme générale suivante :

$$\log Q = A + B \log h_1 + C [\log h_1]^2 \quad (14)$$

Les variables A, B et C sont présentées dans le Tableau 11. L'erreur attendue pour l'application de l'équation est de 3 % ou moins.

Tableau 11 : Valeurs des variables pour l'application de l'équation de débit en écoulement libre (BOS)¹²

Type de canal	D		Débit maximal	Valeur des variables		
	mètre	pieds		A	B	C
HS	0,122	0,4	2,27	-0,4361	+2,5151	+0,1379
	0,183	0,6	6,14	-0,4430	+2,4908	+0,1657
	0,244	0,8	12,7	-0,4410	+2,4571	+0,1762
	0,305	1,0	22,3	-0,4382	+2,4193	+0,1790
H	0,152	0,5	9,17	+0,0372	+2,6629	+0,1954
	0,229	0,75	26,9	+0,0351	+2,6434	+0,2243
	0,305	1,0	53,5	+0,0206	+2,5902	+0,2281
	0,457	1,5	150	+0,0238	+2,5473	+0,2540
	0,610	2,0	309	+0,0237	+2,4918	+0,2605
	0,762	2,5	542	+0,0268	+2,4402	+0,2600
	0,914	3,0	857	+0,0329	+2,3977	+0,2588
	1,37	4,5	2 366	+0,0588	+2,3032	+0,2547
HL	1,219	4,0	3 298	+0,3160	+2,3466	+0,2794

¹² Discharge measurement structures (BOS).

Des tables hauteur – débit sont aussi offertes¹³ pour chaque type et dimension de canal en H dans le but d'établir directement le débit en fonction de la hauteur d'eau (h_1). Afin de diminuer le plus possible l'erreur sur la valeur du débit, on doit se référer à la formule théorique et à la table hauteur – débit fournie par le fabricant.

Écoulement noyé

Le rapport de submersion d'un canal en H est défini comme le rapport, exprimé en pourcentage, entre la hauteur d'eau mesurée en aval du canal (h_2) et la hauteur d'eau mesurée au point de mesure (h_1). Le niveau zéro pour les mesures h_1 et h_2 fait référence au radier du canal (HS, H ou HL).

Le calcul du débit en écoulement noyé est possible, mais en raison de la complexité de la méthode de calcul, les canaux HS et H devraient être installés de façon à respecter un taux de submersion inférieur à 25 %; et en ce qui concerne le canal HL, ce taux devrait être inférieur à 30 %.

Modifications apportées au canal

Les dimensions théoriques d'un canal en H doivent être respectées. Dans le cas contraire, un réétalonnage de l'élément primaire doit être effectué pour valider la relation hauteur – débit.

Comme l'utilisation de canaux modifiés est fortement déconseillée, ce sujet n'est pas abordé en détail dans le présent cahier.

Le canal en H...

3 types : HS / H / HL.



Couvre des débits de $0,3216 \text{ m}^3/\text{j}$ (HS de $0,122 \text{ m}$) à $284\ 160 \text{ m}^3/\text{j}$ (HL de $1,219 \text{ m}$).

Combine les caractéristiques physiques et mécaniques du déversoir et du canal jaugeur.

La hauteur d'eau admissible (section D) détermine le type et les dimensions.

Devrait être utilisé à 70 – 100 % de sa capacité, éviter un canal surdimensionné.

Réaliser régulièrement une inspection du canal basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

¹³ *Discharge measurement structures (BOS)*.

3.2.6 Déversoirs – Généralités

Un déversoir est une structure construite perpendiculairement au sens de l'écoulement de l'eau dans une conduite découverte. Il peut être utilisé pour contrôler le niveau d'eau de surface en amont ainsi que pour mesurer le débit.

Cette structure à débordement a pour effet d'augmenter le niveau de l'eau en amont, comme le ferait un barrage. L'eau doit passer par-dessus une échancrure de forme et de dimension qui définissent le type de déversoir utilisé. Cette structure a donc pour effet de provoquer une perte de charge importante, particulièrement dans des canaux plats sans inclinaison, et entraîne par conséquent une perturbation importante de l'écoulement.

La hauteur d'eau qui passe au-dessus de la structure est proportionnelle au débit. On détermine donc le débit en mesurant la hauteur verticale, entre la base de la crête et la surface de l'eau, à une distance déterminée en amont du déversoir, et en se servant de l'équation ou de la table appropriée à la forme et à la dimension du déversoir.

Le déversoir est une structure simple et moins dispendieuse comparativement aux autres éléments primaires. La construction peut être faite sur mesure, mais les normes de construction doivent être rigoureusement respectées. Il permet d'obtenir des mesures de débit exactes lorsque la construction, l'installation et l'entretien sont adéquats.

Le déversoir est nommé par la forme de la section de contrôle de l'écoulement. Le présent cahier traitera des déversoirs en mince paroi et à seuil épais, dont la distinction s'établit par rapport à la longueur du déversoir dans le sens de l'écoulement (l) et à la hauteur d'eau mesurée au point de mesure amont (h) :

$$\text{Déversoir à seuil épais} = h < 1,6l$$

$$\text{Déversoir en mince paroi} = h > 2l$$

Dans le cas d'un seuil n'étant ni mince ni épais, aucune loi ne peut être utilisée a priori et une étude est nécessaire.

Les composantes des déversoirs et les phénomènes reliés à ce type d'installation sont présentés à la Figure 28 (déversoir en mince paroi) et à la Figure 38 (déversoir à seuil épais) et sont décrites dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Identification et description des composantes des déversoirs

Identification	Description
Crête (ou seuil)	Bordure par-dessus laquelle l'eau s'écoule
Échancrure	Encoche en angle par laquelle l'eau s'écoule
Pelle (p)	Hauteur du déversoir entre la crête et le fond du canal (m)
Nappe	Hauteur de l'écoulement d'eau par-dessus la crête
Ventilation	Espace d'air situé sous la nappe, du côté aval du déversoir
b	Largeur du déversoir perpendiculairement à la direction de l'écoulement, aussi décrite comme la longueur de crête du déversoir (m)
B	Largeur du canal (m)
h_{max}	Hauteur maximale admissible au déversoir (m)
h (ou h_1)	Hauteur d'eau mesurée au point de mesure amont (m)
h_2	Hauteur d'eau mesurée au point de mesure aval (m)
l	Longueur du déversoir dans le sens de l'écoulement (m)
Point de mesure (P_m)	Emplacement de la mesure de la hauteur de la surface de l'eau
Abaissement de la surface	Baisse locale de la surface de l'eau dans le canal d'approche, due à une accélération de l'écoulement au passage d'un obstacle ou d'un bief de contrôle

3.2.6.1 Déversoir en mince paroi (ou déversoir à crête mince)

Description

La crête de ce déversoir est constituée d'une mince plaque métallique positionnée verticalement, ce qui fait qu'en conditions d'écoulement libre, la lame déversante est en contact avec la crête uniquement sur une ligne mince. Comparativement aux déversoirs présentant un seuil plus épais, la ligne de courant au-dessus de la crête est fortement incurvée et la hauteur d'eau au-dessus de la crête est importante par rapport à l'épaisseur de la crête (Figure 28).

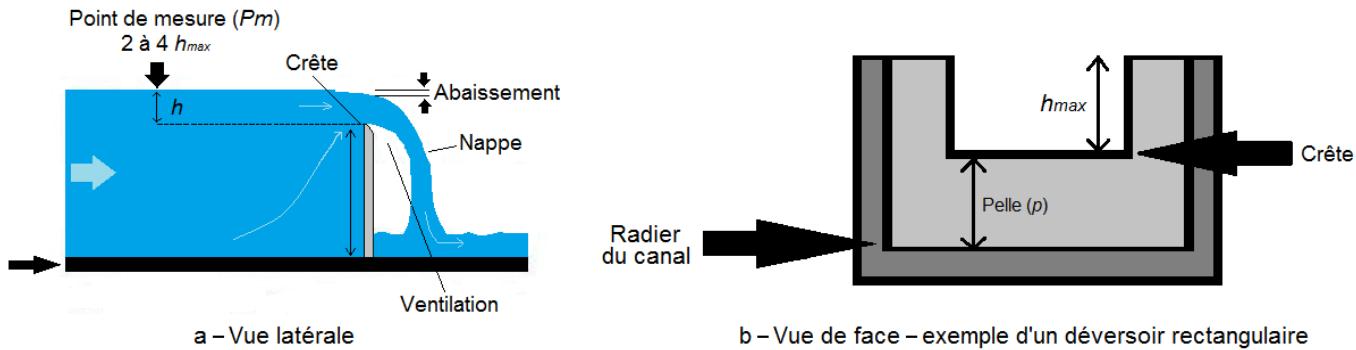


Figure 28 : Composantes d'un déversoir en mince paroi présentant des conditions d'écoulement libre

Les déversoirs en mince paroi sont classifiés en fonction de la forme de l'échancrure. Il est plus fréquent de rencontrer des déversoirs sans contraction latérale (aussi nommé déversoir réprimé, car la lame déversante n'a pas de contraction latérale), rectangulaire (avec contraction) et triangulaire, bien que d'autres types de déversoirs tels que le trapézoïdal et le circulaire existent (Figure 29).

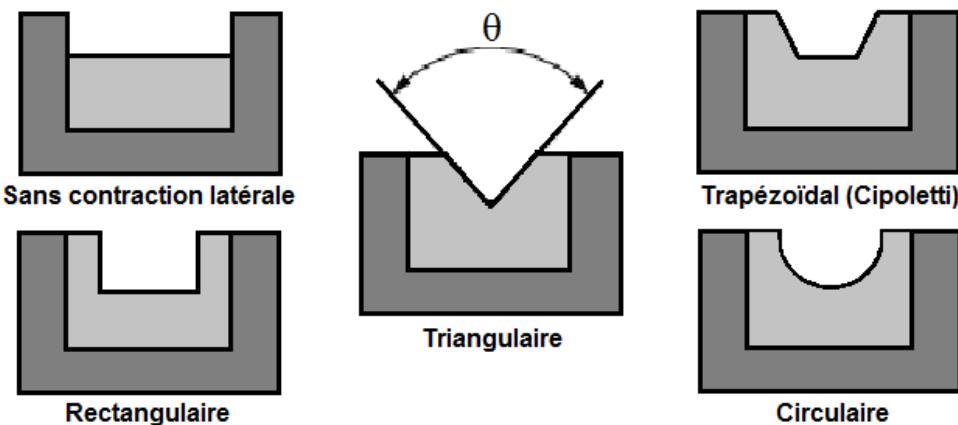


Figure 29 : Types de déversoirs en mince paroi selon la forme de l'échancrure

Applications

En raison de la variété de ses formes géométriques et de ses dimensions, ce type d'élément primaire peut mesurer une très grande étendue de débits. Les caractéristiques de l'effluent devront être prises en considération dans la sélection d'un déversoir. Par exemple, l'angle fermé du déversoir triangulaire permet de mesurer de faibles débits avec une incertitude réduite. Il présente donc une meilleure sensibilité comparativement au déversoir rectangulaire ou trapézoïdal.

Le déversoir sert généralement sur une base temporaire plutôt que permanente bien qu'une installation permanente demeure possible. Son utilisation s'applique principalement pour de petits canaux ou de petits cours d'eau. Il est adapté aux effluents où l'impact de la perte de charge sera amoindri. Son utilisation n'est pas recommandée dans le cas d'eaux fortement

chargées en matières en suspension, mais si tel est le cas, il doit faire l'objet d'attention constante pour qu'on puisse prévenir le blocage de la structure causé par le dépôt de solides en amont du déversoir.

Principe de fonctionnement

Le déversoir en mince paroi est un dispositif par-dessus lequel l'eau s'écoule en permettant le contrôle du niveau de l'écoulement. En écoulement libre, le débit est déterminé par l'application d'une relation entre le débit et la hauteur de la lame d'eau mesurée en amont du déversoir. La nappe d'eau doit se déverser librement vers l'aval avec la création d'une zone d'air libre (ventilation) entre le déversoir et cette nappe (Figure 30 a), ce qui implique que la hauteur d'eau à l'amont du déversoir ne dépend pas de la hauteur d'eau à l'aval.

Les nappes sans aération caractérisées par une pression instable sous la nappe (Figure 30 b) ou qui s'accrochent au déversoir (Figure 30 c) ainsi que les nappes dont l'aération est insuffisante (nappes « noyées en dessous ») à cause d'une élévation du niveau de l'eau sous la nappe (Figure 30 d) sont à éviter.

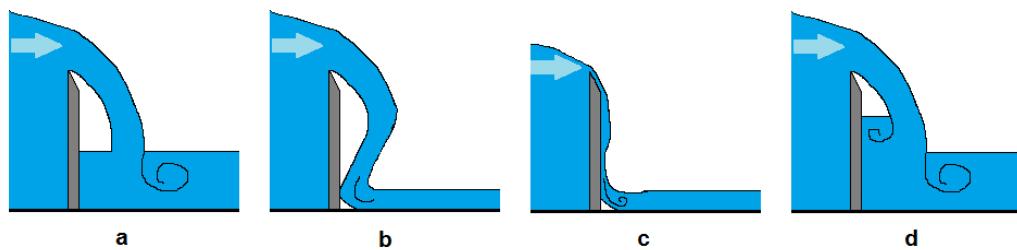


Figure 30 : Exemples de nappes déversantes sur un déversoir en mince paroi

La mesure du débit dépend donc de la hauteur d'eau dans le déversoir, mais aussi de la dimension et de la forme de ce dernier, des dimensions géométriques du canal d'approche, des propriétés dynamiques de l'eau, de l'aération de la nappe déversante ainsi que d'un coefficient de débit déterminé expérimentalement.

Dimensions standard

La dimension d'un déversoir doit être sélectionnée après qu'on a procédé à des études préliminaires permettant d'établir l'intervalle de mesure des débits attendus. Le déversoir doit être dimensionné de manière à ce que l'écoulement maximal corresponde à environ 70 à 100 % de sa capacité maximale. Un déversoir surdimensionné peut entraîner une baisse d'exactitude à de faibles débits, alors qu'un déversoir sous-dimensionné peut rapidement présenter des conditions d'écoulement noyé lorsque le débit est plus important.

Les dimensions standard sont propres à chaque type de déversoir en mince paroi.

Le déversoir rectangulaire possède des contractions latérales qui font que l'ouverture au-dessus de la crête est moins grande que la largeur du canal dans lequel il est placé ($b/B \neq 1$) (Figure 31).

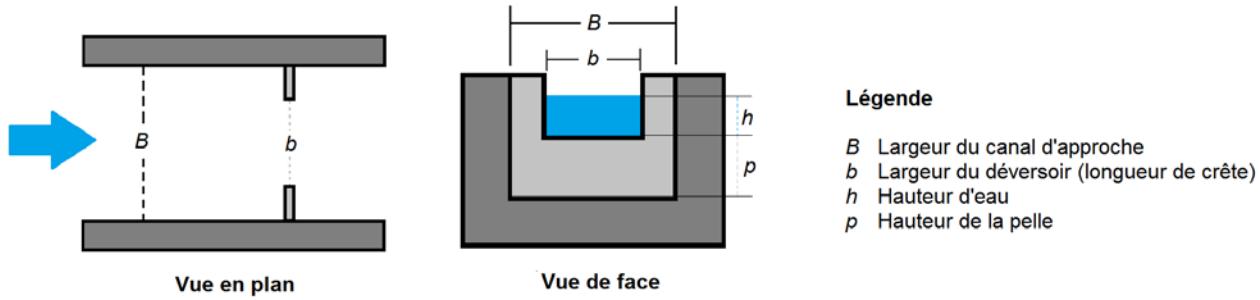


Figure 31 : Caractéristiques d'un déversoir rectangulaire

Cette forme de base normalisée peut présenter une variante sans contraction latérale. Dans ce cas $b/B = 1,0$, c'est-à-dire lorsque la largeur du déversoir (b) est égale à la largeur du canal d'approche (B) (Figure 32).

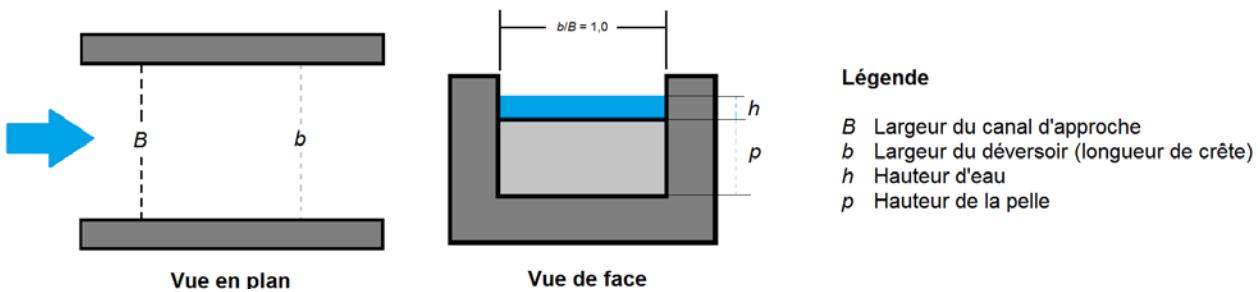


Figure 32 : Caractéristiques d'un déversoir sans contraction latérale

Le déversoir triangulaire présente aussi des contractions bordant les deux côtés de l'échancrure en angle (Figure 33). L'angle le plus fréquent pour les déversoirs triangulaires est de 90° , bien que des angles différents soient offerts, dont ceux de $22\frac{1}{2}^\circ$, 30° , 45° et 120° .

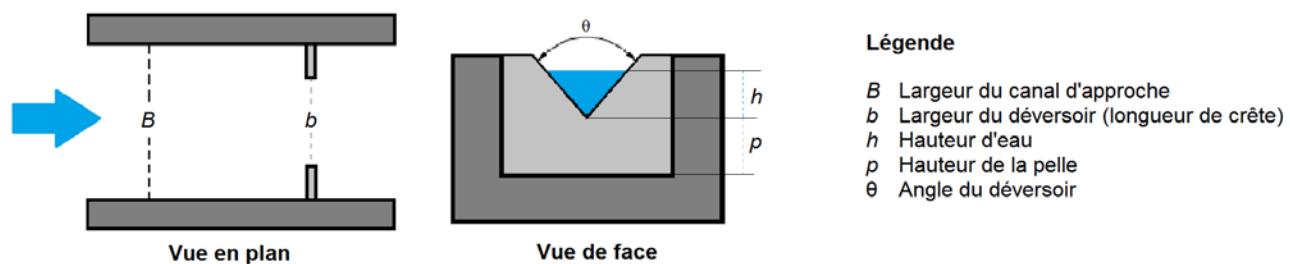


Figure 33 : Caractéristiques d'un déversoir triangulaire

Les proportions et les dimensions des différentes sections d'un déversoir doivent être respectées lors de la conception pour permettre un écoulement optimal favorisant une mesure de débit exacte :

h

Une hauteur d'eau minimale est requise pour que soit évité le phénomène de « nappe adhérente » (Figure 30, c), qui se manifeste lorsque le débit est très faible;

h/p	Étant donné les difficultés de mesurage de la hauteur d'eau et les erreurs provoquées par les remous et les vagues qui se manifestent dans le canal d'approche, le rapport h/p (hauteur d'eau / hauteur de la pelle) présente une valeur maximale à ne pas dépasser;
b	La largeur de l'échancrure (b) présente des limitations en raison des erreurs provoquées par les effets combinés de la viscosité et de la tension superficielle;
p et $B - b$	Des limitations pour la hauteur de la pelle (p) ainsi que pour la proportion de la largeur du canal par rapport à celle de l'échancrure ($B - b$) sont mises en place en vue d'éviter les instabilités provoquées par les courants parasites (remous, tourbillons, etc.) qui se manifestent entre les limites du canal et le déversoir lorsque les valeurs de (p) et de ($B - b$) sont faibles.

En plus d'être considérés pour la conception du déversoir, ces critères prennent la forme de limites d'application pour certaines équations de débit, comme décrit dans le Tableau 14.

Intervalle de mesure

Contrairement à certains éléments primaires, dont le canal Parshall, le déversoir n'est pas une structure préfabriquée comportant des dimensions standard qui correspondent à un intervalle de mesure de débit. Pour une même hauteur d'eau, le débit obtenu pourra être différent parce qu'en plus de la hauteur d'eau, l'équation considère d'autres variables telles que la largeur du déversoir et le coefficient de débit.

Différentes relations présentées dans la littérature permettent de calculer le débit en fonction de la géométrie et de la dimension du déversoir. Il est important de respecter rigoureusement les dimensions de chacune des sections du déversoir, les critères de conception ainsi que les hauteurs minimales et maximales recommandées pour obtenir une mesure de débit exacte.

La longueur minimale de la crête (b) d'un déversoir rectangulaire ou sans contraction devrait être d'au moins 0,3 m. Sinon, il est préférable d'opter pour un déversoir triangulaire, qui offrira une plus grande exactitude à petits débits.

Théoriquement, il n'y a pas de longueur maximale de crête pour les déversoirs rectangulaire et sans contraction. Les contraintes sont plutôt d'ordre pratique et économique. Pour que la relation hauteur – débit demeure conforme, la hauteur d'eau au-dessus de la crête ne doit toutefois pas dépasser la moitié de la longueur de la crête (ex. : pour une longueur de crête de 1 m, la hauteur d'eau maximale ne devrait pas dépasser 0,5 m).

Conditions d'installation

Le déversoir en mince paroi dépend particulièrement des caractéristiques d'installation qui contrôlent la distribution de la vitesse dans le canal d'approche ainsi que de la construction de la crête du déversoir en respect avec les spécifications standard.

Le déversoir doit être installé dans une section droite du canal. La longueur du canal d'approche doit être équivalente à au moins cinq fois la largeur de la nappe d'eau à la hauteur maximale d'écoulement. Dans le cas contraire, la vitesse d'approche peut être trop grande et par conséquent, la mesure de la hauteur d'eau et le débit seront probablement surévalués. Le canal d'approche devrait être rectiligne, lisse et horizontal pour favoriser un écoulement uniforme et stable ainsi qu'une bonne distribution des vitesses. Il ne doit présenter aucune courbe, aucune chute, ni aucun branchement de conduite.

Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 20 %. Des déflecteurs peuvent être utilisés pour favoriser une distribution adéquate des vitesses, mais leur emplacement doit respecter la distance minimale en amont du déversoir. On peut corriger la vitesse d'approche en augmentant simplement la hauteur de la pelle du déversoir.

Le déversoir est généralement manufacturé dans une plaque constituée d'un matériau rigide résistant à la corrosion (acier inoxydable) ou recouvert d'un film protecteur. L'épaisseur de la plaque doit être comprise entre 1 et 2 mm. Pour une épaisseur plus grande, la plaque doit comporter une bordure chanfreinée d'un angle minimal de 45° du côté aval servant à réduire l'épaisseur de la crête à la valeur de 1 à 2 mm (Figure 34).

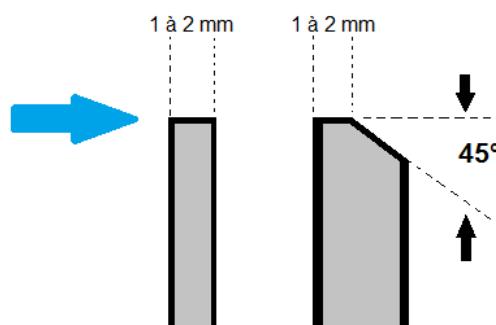


Figure 34 : Détails de la crête d'un déversoir en mince paroi

Le déversoir doit être solidement maintenu en place pour pouvoir résister aux plus forts débits sans distorsions ni dommages. Le déversoir doit être installé perpendiculairement par rapport aux parois du canal d'écoulement, et les axes vertical et transversal doivent être de niveau. Il faut que la forme géométrique du déversoir soit découpée avec exactitude. La surface de la crête doit être de niveau sur toute sa longueur, lisse, et présenter une arête vive à son intersection avec la face amont de la plaque du déversoir. Il est important que l'échancrure soit symétrique et équidistante par rapport aux parois du canal d'écoulement.

Les joints entre la plaque du déversoir, les côtés et le fond du canal doivent être résistants et étanches afin que toute l'eau soit canalisée par le déversoir.

La nappe d'eau doit être en contact uniquement avec le côté amont de la crête, donc libre de la paroi aval du déversoir. La présence de ventilation entre la pelle et la nappe est un indicateur d'un écoulement libre (Figure 30 a).

Pour éviter un écoulement noyé causé par du refoulement, la capacité de la conduite d'évacuation doit être suffisante dans le but de permettre une évacuation immédiate de l'eau au débit maximal.

Le niveau maximal de la surface de l'eau en aval doit être d'au moins 5 cm sous la crête. Dans le cas contraire, on doit s'assurer que la nappe reste continuellement ventilée sur toute sa longueur afin de prévenir l'apparition de conditions d'écoulement noyé.

Lors de l'installation d'un déversoir, il est important d'en prévoir l'accessibilité pour l'inspection et l'entretien. 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.

Point de mesure

La hauteur d'eau correspond à la différence entre la crête et la surface de l'eau au point de mesure. Le point zéro du déversoir correspond donc à la hauteur de l'arête bien que la mesure du niveau d'eau ne se fasse pas directement sur l'arête du déversoir. Cette mesure doit plutôt être transposée avec précision au point de mesure à l'aide d'un niveau et d'une règle ou d'une équerre, comme illustré à la Figure 35.

En conditions d'écoulement libre, le point de mesure doit se situer en amont du déversoir, à une distance équivalant à deux à quatre fois la hauteur maximale admissible au déversoir afin que la mesure ne soit pas influencée par l'effet d'abaissement de la surface de l'eau. Il est conseillé d'effectuer la mesure de la hauteur d'eau de préférence dans un puits de mesurage. L'aménagement de ce puits de mesurage doit correspondre aux critères d'installation décrits à la section 3.2.3. Une règle de référence doit être installée de façon permanente au point de mesure.

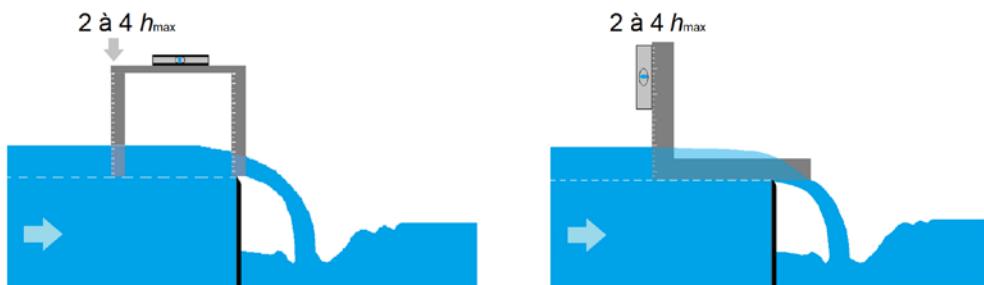


Figure 35 : Exemples de méthodes de mesure de la hauteur d'eau amont à partir du point zéro d'un déversoir sans contraction

Écoulement libre

Pour que l'équation associée au déversoir permette d'obtenir une mesure de débit exacte, l'écoulement doit être libre. L'écoulement dans un déversoir est considéré comme libre (ou critique) lorsque les hauteurs d'eau amont et aval sont indépendantes. Cela signifie que le niveau d'eau à l'aval est suffisamment bas pour ne pas interférer avec la ventilation sous la

nappe (minimum de 5 cm sous la crête) et que l'écoulement est suffisamment éloigné de la pelle pour permettre à l'air de circuler librement sous la nappe.

Équation de débit en écoulement libre

En écoulement libre, le niveau d'eau aval n'influence pas le niveau amont et n'est donc pas inclus dans l'équation de débit. En contrepartie, le débit d'eau dans le déversoir est influencé de façon importante par les caractéristiques physiques de l'élément primaire et par 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. Les équations simplifiées sont valides pour un déversoir idéal, dénoyé et présentant une vitesse d'approche faible. Des équations plus élaborées permettent d'obtenir un calcul de débit plus précis. Ces équations s'appuient sur l'utilisation d'abaques ou de figures pour déterminer les différentes variables de l'équation. Les équations sont à utiliser avec précaution, particulièrement lorsque la hauteur d'eau sur la crête est très faible par rapport à la largeur de la lame déversante. Dans ce cas, une petite incertitude sur la hauteur d'eau entraîne une incertitude importante sur le débit. Les équations de débit et l'expression du coefficient de débit dépendent aussi de l'aération de la nappe déversante et ne sont applicables que dans le cas d'une nappe libre. Dans le cas contraire, les pertes d'énergie provoquées engendrent une erreur supplémentaire sur la mesure du débit.

Les limites d'application des équations, basées sur les dimensions du déversoir, sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Limites d'application des équations pour les types de déversoirs

Type	Équation simplifiée	Équation préconisée
Déversoir rectangulaire	$h > 1/3 b$ $p = 2h_{\max} \text{ minimum}$ <p>longueur de chaque contraction latérale = $2h_{\max}$ minimum</p>	$h/p \leq 2,5$ $h \geq 0,03 \text{ m}$ $b \geq 0,15 \text{ m}$ $p \geq 0,10 \text{ m}$ $(B - b) / 2 \geq 0,10 \text{ m}$
Déversoir sans contraction	$h < 1/3 b$ $p = 2h_{\max} \text{ minimum}$	$h/p \leq 4,0$ $0,03 \leq h \leq 1,0 \text{ m}$ $b \geq 0,30 \text{ m}$ $p \geq 0,06 \text{ m}$
Déversoir triangulaire	$p = 2h_{\max} \text{ minimum}$ <p>longueur de chaque contraction latérale = $2h_{\max}$ minimum</p>	$h/p \leq 0,4$ $h/B \leq 0,2$ $0,05 \leq h \leq 0,38 \text{ m}$ $p \geq 0,45 \text{ m}$ $B \geq 1 \text{ m}$

Le Tableau 14 présente les équations simplifiées et préconisées pour un déversoir rectangulaire. L'équation préconisée inclut un coefficient (C_d) déterminé en fonction du type et de la forme de la structure et selon la relation entre b/B , θ et β présentée dans le Tableau 15. Les valeurs intermédiaires de b/B peuvent être extrapolées de façon linéaire. Un exemple de calcul pour ces deux équations est présenté dans le Tableau 16.

Tableau 14 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir rectangulaire

Équation simplifiée ¹⁴	Équation préconisée ¹⁵
$Q = C(b - 0,2h)h^{1,5}$ <p>Q = débit (m³/h ou l/s) C = constante fonction des unités 1 838 si Q en l/s 6 618 si Q en m³/h b = largeur déversoir (m) h = hauteur d'eau (m)</p>	$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}C_d b_e h_e^{1,5}$ <p>Q = débit (m³/s) g = accélération de la pesanteur (9,81 m/s² ou $\sqrt{2g} = 4,43$) C_d = coefficient fonction du type et de la forme de la structure, établi selon l'équation : $C_d = \theta + \beta \frac{h}{p}$ θ et β = dépendent du ratio b/B (Tableau 15) h = hauteur d'eau (m) p = hauteur de la pelle (m) $b_e = b + 0,003 m$ $h_e = h + 0,001 m$</p>

Tableau 15 : Relation entre b/B , θ et β ¹⁶

b/B	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
θ	0,588	0,589	0,590	0,591	0,592	0,593	0,594	0,596	0,598	0,602
β	-0,002	-0,002	0,002	0,006	0,011	0,018	0,030	0,045	0,064	0,075

¹⁴ Équation de Francis. Constante décrite par *Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*, 2017.

¹⁵ Équation de Kindsvater-Carter. Coefficient (C_d) décrit par *Streamflow Measurement*, 2009.

¹⁶ *Streamflow Measurement*.

Tableau 16 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir rectangulaire

	Équation simplifiée	Équation préconisée
Configuration du déversoir	$b = 1 \text{ m}$ $B = 2 \text{ m}$	$h = 0,2 \text{ m}$ $p = 0,4 \text{ m}$
Vérification des limitations	Conforme au Tableau 13	
Détermination du débit	$Q = C (b - 0,2h)h^{1,5}$ $Q = 6\,618 [1 - (0,2 \times 0,2)]0,2^{1,5}$ $Q = 568,25 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d b_e h_e^{1,5}$ $C_d = \theta + \beta \frac{h}{p}$ (fonction de b/B , Tableau 15) $C_d = 0,592 + 0,011 \frac{0,2}{0,4} = 0,5975$ $b_e = 1 + 0,003 = 1,003$ $h_e = 0,2 + 0,001 = 0,201$ $Q = \frac{2}{3} \times 4,43 \times 0,5975 \times 1,003 \times 0,201^{1,5}$ $Q = 0,1595 \text{ m}^3/\text{s} (574,18 \text{ m}^3/\text{h})$

Les équations simplifiées et préconisées pour un déversoir sans contraction sont décrites dans le Tableau 17. L'équation préconisée inclut un coefficient (C_d) fonction de l'équation $0,602 + 0,083 h/p$. Un exemple de calcul pour ces deux équations est présenté dans le Tableau 18.

Tableau 17 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir sans contraction

Équation simplifiée ¹⁷	Équation préconisée ¹⁸
$Q = C b h^{1,5}$ $Q = \text{débit (m}^3/\text{s ou l/s)}$ $C = \text{constante fonction des unités}$ $1\,838 \text{ si } Q \text{ en l/s}$ $6\,618 \text{ si } Q \text{ en m}^3/\text{h}$ $b = \text{largeur déversoir (m)}$ $h = \text{hauteur d'eau (m)}$	$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_e^{1,5}$ $Q = \text{débit (m}^3/\text{s)}$ $C_d = \text{coefficient de débit}$ $C_d = 0,602 + 0,083 \frac{h}{p}$ $h = \text{hauteur d'eau (m)}$ $p = \text{hauteur de la pelle (m)}$ $g = \text{accélération de la pesanteur}$ $(9,81 \text{ m/s}^2 \text{ ou } \sqrt{2g} = 4,43)$ $b = \text{largeur du déversoir (m)}$ $h_e = h + 0,0012 \text{ m}$

¹⁷ Équation de Francis. Constante décrite par *Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*.

¹⁸ Équation de Kindsvater-Carter. Coefficient (C_d) décrit par *Streamflow Measurement*.

Tableau 18 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir sans contraction

	Équation simplifiée	Équation préconisée
Configuration du déversoir	$b = 1 \text{ m}$ $B = 1 \text{ m}$	$h = 0,2 \text{ m}$ $p = 0,4 \text{ m}$
Vérification des limitations	Conforme au Tableau 13	
Détermination du débit	$Q = C b h^{1,5}$ $Q = 6\,618 \times 1 \times 0,2^{1,5}$ $Q = \mathbf{591,93 \text{ m}^3/\text{h}}$	$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_e^{1,5}$ $C_d = 0,602 + 0,083 \left(\frac{0,2}{0,4} \right) = 0,6435$ $\sqrt{2g} = 4,43$ $h_e = 0,2 + 0,0012 = 0,2012$ $Q = 0,6435 \times \frac{2}{3} \times 4,43 \times 1 \times 0,2012^{1,5}$ $Q = 0,21715 \text{ m}^3/\text{s} (\mathbf{617 \text{ m}^3/\text{h}})$

Les équations simplifiées et préconisées pour un déversoir triangulaire sont décrites dans le Tableau 19. L'équation simplifiée inclut un coefficient (C) fonction de l'angle de l'échancrure et de l'unité de mesure (l/s ou m^3/h). Les valeurs de ce coefficient sont présentées dans le Tableau 20.

Le coefficient (C_d) de l'équation préconisée est aussi fonction de l'angle de l'échancrure et est déterminé par la Figure 36. Pour le déversoir 90° , le coefficient et le débit sont directement reliés à la hauteur d'eau. Plusieurs références sont disponibles dans la littérature et sur Internet ou encore sont offertes par le fabricant; elles permettent de connaître directement le coefficient à partir d'une table de conversion en fonction de la hauteur d'eau (ex. : *Streamflow Measurement*).

Tableau 19 : Équations de débit en écoulement libre pour un déversoir triangulaire

Équation simplifiée ¹⁹	Équation préconisée ²⁰
$Q = C h^{2,5}$ <p>C Constante fonction de l'angle du déversoir et des unités de mesure (Tableau 20)</p>	$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$ <p>g Accélération due à la pesanteur, constante $9,81 \text{ m/s}^2$ ($\sqrt{2g} = 4,43$)</p> <p>C_d Coefficient déterminé selon l'angle du déversoir (Figure 36). Pour le 90°, se référer à la table de conversion appropriée.</p>

¹⁹ Équation de Francis. Constante décrite par *Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*.

²⁰ Équation de la British Standards Institution (BSI). Coefficient (C_d) décrit par *Streamflow Measurement*.

Tableau 20 : Valeur du coefficient « C » selon l’unité de mesure²¹

Angle	l/s	m^3/h
$22,5^\circ$	$Q = 274,4 h^{2,5}$	$Q = 987,8 h^{2,5}$
30°	$Q = 373,2 h^{2,5}$	$Q = 1344 h^{2,5}$
45°	$Q = 571,4 h^{2,5}$	$Q = 2057 h^{2,5}$
60°	$Q = 796,7 h^{2,5}$	$Q = 2868 h^{2,5}$
90°	$Q = 1380 h^{2,5}$	$Q = 4969 h^{2,5}$
120°	$Q = 2391 h^{2,5}$	$Q = 8606 h^{2,5}$

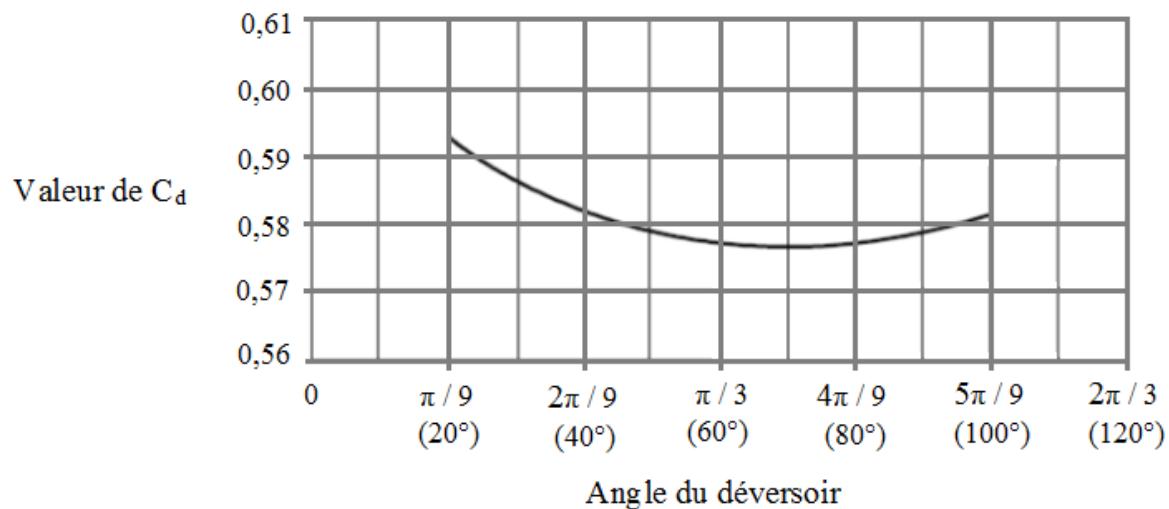


Figure 36 : Relation du coefficient (C_d) selon l’angle du déversoir²²

Un exemple de calcul pour ces deux équations est présenté dans le Tableau 21.

²¹ Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook.

²² Adaptation, Streamflow Measurement.

Tableau 21 : Exemples de calcul de débit pour un déversoir triangulaire

	Équation simplifiée	Équation préconisée
Configuration du déversoir	$b = 0,8 \text{ m}$ $B = 1,2 \text{ m}$ $h = 0,2 \text{ m}$	$p = 0,6 \text{ m}$ $\theta = 45^\circ$
Vérification des limitations	Conforme au Tableau 13	
Détermination du débit	$Q = C h^{2,5}$ $Q = 2057 (0,2^{2,5})$ $Q = 36,80 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$ $\sqrt{2g} = 4,43$ $C_d = 0,58$ $\tan \frac{\theta}{2} = 0,4142$ $h^{5/2} = 0,01789$ $Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$ $Q = 0,01015 \text{ m}^3/\text{s} (36,56 \text{ m}^3/\text{h})$

Écoulement noyé

L'écoulement dans un déversoir est considéré comme étant noyé (ou submergé) lorsqu'il est affecté par les conditions en aval.

Dans un premier temps, le niveau d'eau en aval monte à un point où l'air ne circule plus librement sous la nappe (Figure 37 a). La hauteur d'eau aval (h_2) peut éventuellement dépasser le niveau zéro de la hauteur d'eau amont (h_1) (Figure 37 b). De telles situations fausseront la mesure puisque la pression en amont du déversoir n'est pas suffisante. En conséquence, la vitesse est trop faible et la hauteur d'eau mesurée est trop grande.

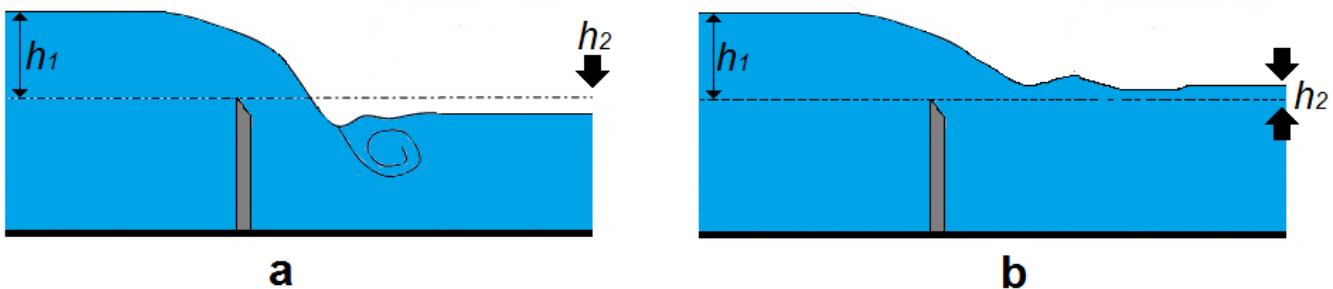


Figure 37 : Illustration d'un écoulement noyé

Cette condition influence l'exactitude de la mesure du débit. Des conditions d'écoulement noyé ou non ventilé ne sont pas recommandées et doivent être évitées. Il est aussi à noter qu'un déversoir n'est pas utilisable lorsque le niveau d'eau en aval submerge la crête du déversoir (Figure 37 b). La dimension choisie d'un déversoir et son installation doivent permettre une ventilation et des conditions d'écoulement libre en tout temps.

L'utilisation d'un déversoir en condition noyée ne fait pas partie des bonnes pratiques et devrait être évitée. Une formule particulière est requise pour le calcul en écoulement noyé puisque les hauteurs h_1 et h_2 doivent être incluses dans le calcul.

Toutefois, la seule façon de corriger cette situation consiste à modifier les installations de mesure, à modifier l'écoulement (lorsque possible) ou tout simplement à changer de type d'élément de mesure, dans le but de favoriser un écoulement libre.

Puisque cette façon de faire n'est pas préconisée et qu'il s'agit d'exceptions, on devra se référer à la norme ISO 1438 afin d'obtenir plus d'information à ce sujet.

Le déversoir en mince paroi...



La classification des déversoirs est basée sur la forme de l'échancrure.

Le choix d'un type de déversoir doit être adapté au débit (ex.: le déversoir triangulaire permet de mesurer de faibles débits avec une incertitude réduite).

Non recommandé dans le cas d'un effluent chargé en sédiments (à cause des risques de colmatage et d'enrassement) ni aux situations où la perte de charge est à éviter.

Doit être dimensionné de manière à ce que l'écoulement maximal corresponde à environ 70 – 100 % de sa capacité.

La nappe d'eau doit se déverser librement vers l'aval avec la création d'une ventilation.

Le point 0 du déversoir correspond à la hauteur de l'arête et le point de mesure se situe à 2-4x la hauteur d'eau maximale (h_{max}) au déversoir.

Réaliser régulièrement une inspection du déversoir basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

3.2.6.2 Déversoir à seuil épais

Description

Un déversoir à seuil épais se caractérise par une hauteur d'eau amont (h_1) faible par rapport à l'épaisseur de la crête (l) (Figure 38), selon le rapport $h_1/l < 1,6$.

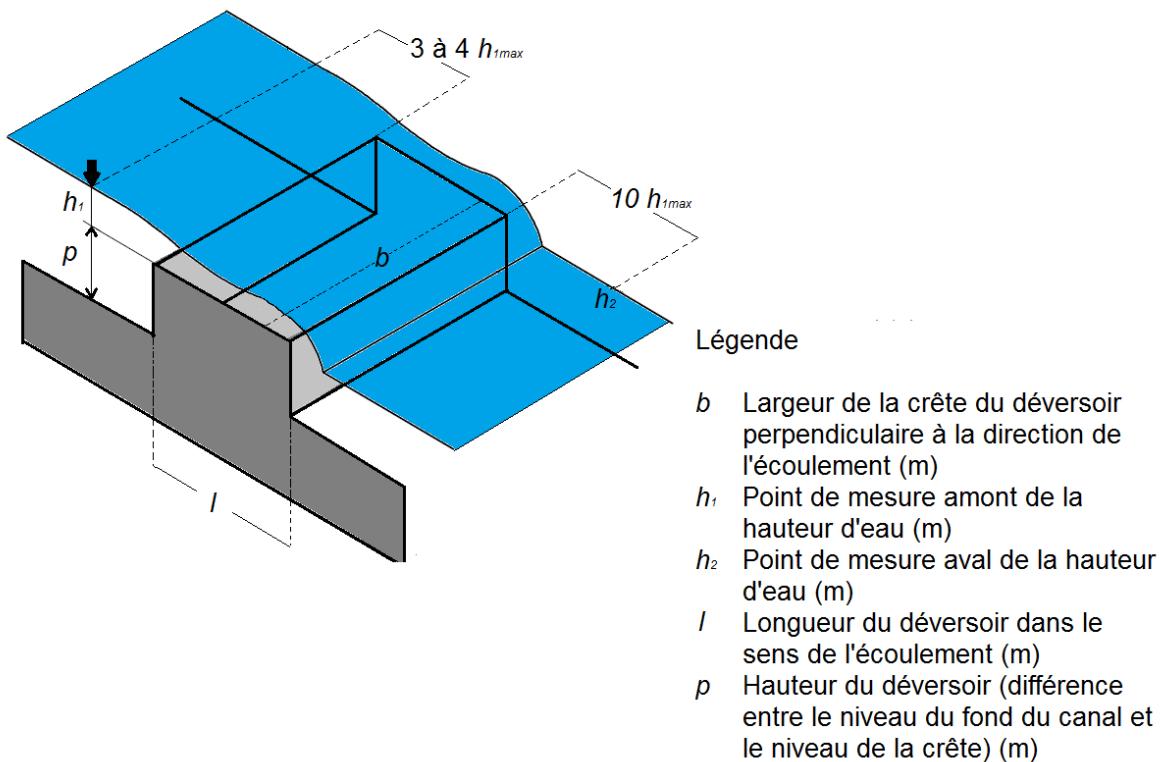


Figure 38 : Déversoir à seuil épais rectangulaire

En plus de leurs caractéristiques géométriques différentes, les déversoirs en mince paroi et ceux à seuil épais se distinguent par leur relation hauteur – débit distincte ainsi que par leurs coefficients C_d .

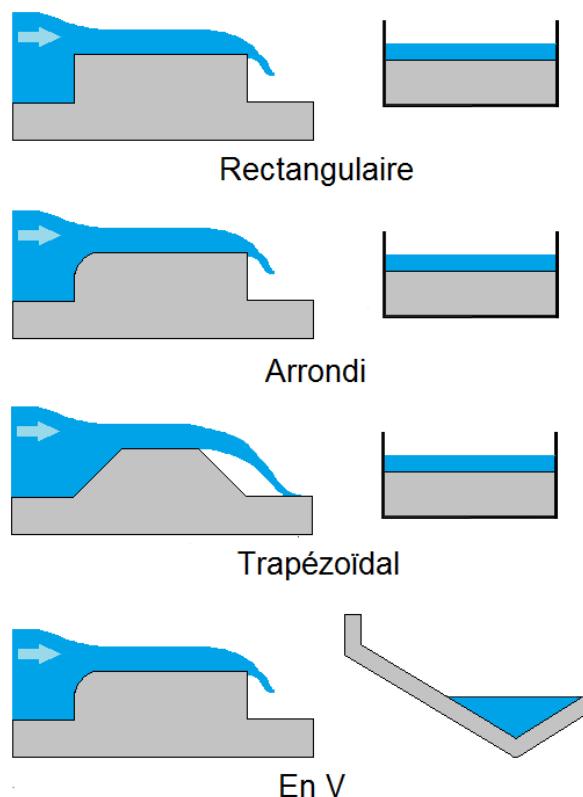
L'Organisation internationale de normalisation (ISO) décrit quatre types de déversoirs à seuil épais : rectangulaire, arrondi, trapézoïdal et en V (Figure 39). Étant le plus souvent rencontré, le déversoir à seuil épais rectangulaire fera l'objet de la présente section. La crête de ce déversoir est une surface plane rectangulaire horizontale dont la face amont forme un angle droit vif à son intersection avec la partie plane de la crête.

Pour toute information au sujet des autres types de déversoirs à seuil épais, on se référera aux normes ISO applicables, par exemple :

ISO 4374 – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Déversoirs horizontaux à seuil épais arrondi;

ISO 4377 – Déterminations hydrométriques – Mesure de débit dans les canaux découverts au moyen de structures – Déversoirs en V ouvert;

ISO 4360 – Hydrométrie – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs à profil triangulaire.



Applications

Le déversoir à seuil épais est plus robuste que le déversoir en mince paroi et est principalement utilisé sur de grands canaux ou des rivières en milieu naturel. Il présente une large gamme de coefficients de débit et il s'agit d'un des plus faciles à construire sur le terrain. Toutefois, comme les autres déversoirs, il occasionne une perte de charge et favorise l'accumulation de limon et de débris.

Principe de fonctionnement

L'installation de mesure complète comprend un canal d'approche, une structure de mesure et un canal aval. Les conditions de chacune de ces trois composantes affectent l'exactitude globale des mesures.

Comme pour le déversoir en mince paroi en écoulement libre, l'écoulement s'accélère dans le canal d'approche jusqu'à devenir critique près du déversoir pour finalement se déverser en aval du déversoir dans une nappe supercritique.

Conditions d'installation

Le site choisi pour l'installation d'un déversoir à seuil épais doit présenter les éléments suivants :

- Berges stables;
- Fond de canal libre d'obstruction;
- Canal d'approche horizontal uniforme et rectiligne sur une longueur correspondant à au moins cinq fois la largeur de surface de l'eau;
- Déflecteurs installés à une distance supérieure à dix fois la hauteur d'eau maximale (lorsque requis);
- Écoulement lisse, exempt de perturbations et présentant une distribution régulière de la vitesse sur la section transversale du canal d'approche;
- Emplacement pouvant recevoir les effets de la perte de charge à tous les niveaux de débit;
- Conduite d'évacuation en aval du déversoir permettant une évacuation immédiate de l'eau au débit maximal.

Le déversoir doit pour sa part présenter les caractéristiques suivantes :

- La structure rigide et étanche permet de résister aux conditions d'écoulement sans déformation ou rupture;
- Le déversoir doit être perpendiculaire à la direction de l'écoulement;
- La crête du déversoir doit être horizontale, plane et lisse;
- La face amont du déversoir doit former un angle droit à son intersection avec la crête du déversoir, car l'arrondissement de cet angle augmente de manière notable le coefficient de débit (C);
- La largeur de la crête (b) (perpendiculaire à la direction de l'écoulement) doit être égale à la largeur du canal dans lequel se trouve le déversoir, donc $b = B$.

Point de mesure

Comme pour le déversoir en mince paroi, la hauteur d'eau correspond à la différence entre la crête et la surface de l'eau au point de mesure.

Le point de mesure amont (h_1) doit être situé à une distance suffisante en amont du déversoir pour qu'il n'y ait pas un abaissement de la surface, tout en étant suffisamment proche pour que la perte d'énergie entre la section de la mesure et la section de contrôle soit négligeable.

Cette distance correspond à trois à quatre fois h_{1max} (Figure 38).

Si le déversoir est utilisé en écoulement noyé, une mesure de la hauteur aval (h_2) est requise. Cette mesure doit se situer à dix fois $h_{1\max}$ en aval du déversoir (Figure 38). À cet endroit, la turbulence associée à la dissipation d'énergie à proximité du déversoir a diminué à un niveau acceptable. La position de mesure de la hauteur d'eau en aval doit être située à l'intérieur des parois latérales parallèles de la structure du déversoir.

Dans certains cas, il est préférable de mesurer la hauteur d'eau dans un puits de mesurage pour réduire les effets des irrégularités de la surface d'écoulement.

On devrait prévoir une méthode visant à vérifier périodiquement le niveau zéro de la mesure de hauteur d'eau afin de valider l'ajustage de l'appareil de mesure.

Écoulement libre

Dans le cas d'un déversoir rectangulaire à seuil épais, si le canal en aval du déversoir est rectangulaire et de même largeur que le déversoir sur une distance égale à la hauteur maximale aval (h_2), la ventilation de la nappe n'est pas nécessaire.

L'écoulement sera libre tant que la limite modulaire (S_1) n'est pas dépassée. Il s'agit du rapport de submersion ($S = h_2/h_1$) à partir duquel le niveau d'eau amont commence à être affecté par le niveau en aval du déversoir. La limite modulaire (S_1) est présentée à la Figure 40.

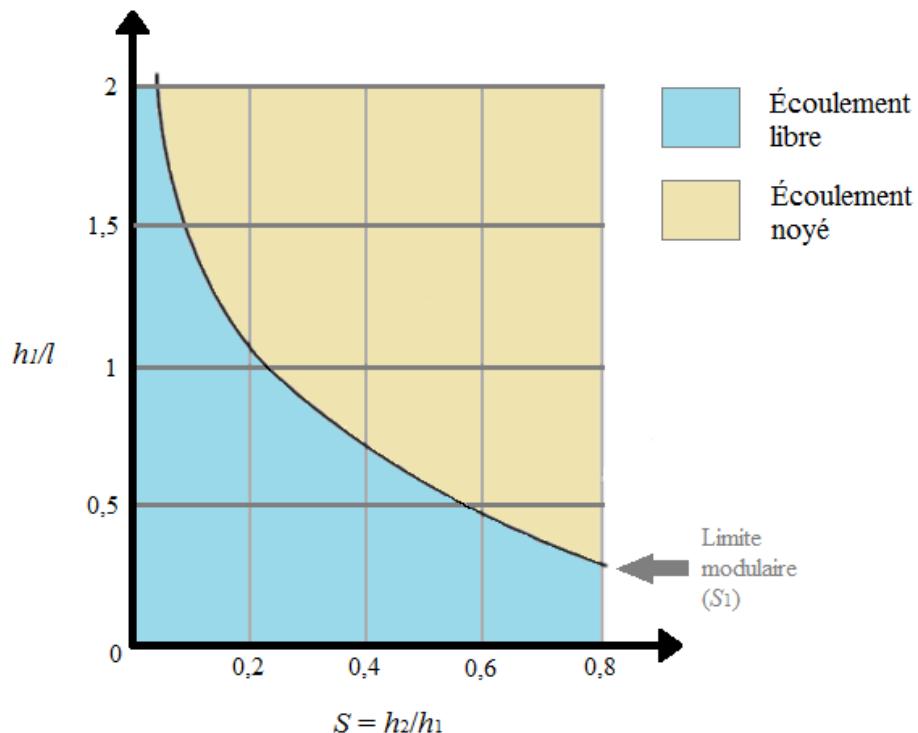


Figure 40 : Limite modulaire (S_1) en tant que fonction de h_1/l ²³

²³ Adaptation, ISO 3846.

Équation de débit en écoulement libre

Les limites d'application de l'équation pour un déversoir rectangulaire à seuil épais en écoulement libre, basées sur les dimensions du déversoir, sont présentées dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Limites d'application de l'équation en écoulement libre

Limites d'application
$h_1 \geq 0,06 \text{ m}$
$b \geq 0,30 \text{ m}$
$p \geq 0,15 \text{ m}$
$0,1 < l/p < 4,0$
$0,1 < h_1/l < 1,6$
$h_1/p < 1,6$

L'équation de débit en écoulement libre pour un déversoir rectangulaire à seuil épais est la suivante²⁴ :

$$Q = C \sqrt{2g} b h_1^{1.5} \quad (15)$$

Où Q débit (m^3/s);
 g accélération due à la gravité (m/s^2);
 b largeur du déversoir perpendiculaire à la direction de l'écoulement (m);
 C coefficient de débit associé à la hauteur d'eau, selon $C = 0,385 A_1$ où A_1 s'établit selon le Tableau 23;
 h_1 hauteur d'eau amont mesurée au point de mesure (m).

²⁴ ONEMA, *Contrôle des débits réglementaires*.

Tableau 23 : Détermination du coefficient A_1 pour un déversoir rectangulaire à seuil épais²⁵

h_1/p	h_1/L																	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,1	0,850	0,850	0,850	0,861	0,870	0,885	0,893	0,925	0,948	0,971	0,993	1,016	1,039	1,062	1,085	1,106	1,130	1,148
0,2	0,855	0,855	0,855	0,864	0,874	0,888	0,907	0,930	0,954	0,977	1,001	1,026	1,050	1,074	1,096	1,120	1,142	1,159
0,3	0,864	0,864	0,864	0,868	0,879	0,894	0,913	0,936	0,961	0,986	1,011	1,037	1,061	1,085	1,110	1,132	1,152	1,169
0,4	0,873	0,873	0,873	0,874	0,885	0,901	0,920	0,945	0,969	0,995	1,021	1,047	1,072	1,097	1,122	1,144	1,163	1,180
0,5	0,882	0,882	0,882	0,883	0,894	0,909	0,929	0,954	0,978	1,005	1,032	1,057	1,083	1,109	1,133	1,154	1,173	1,188
0,6	0,892	0,892	0,892	0,894	0,904	0,920	0,941	0,964	0,990	1,016	1,043	1,067	1,094	1,120	1,143	1,164	1,182	1,196
0,7	0,901	0,901	0,901	0,906	0,916	0,932	0,952	0,975	1,000	1,026	1,052	1,077	1,104	1,129	1,152	1,171	1,188	1,203
0,8	0,911	0,911	0,912	0,916	0,926	0,942	0,962	0,985	1,010	1,036	1,062	1,086	1,112	1,136	1,158	1,176	1,194	1,209
0,9	0,921	0,921	0,922	0,926	0,936	0,952	0,972	0,996	1,021	1,046	1,072	1,096	1,120	1,143	1,163	1,181	1,199	1,214
1,0	0,929	0,929	0,931	0,936	0,946	0,962	0,982	1,006	1,031	1,056	1,081	1,106	1,128	1,150	1,169	1,187	1,204	1,220
1,1	0,935	0,937	0,940	0,946	0,956	0,972	0,993	1,017	1,042	1,066	1,092	1,115	1,138	1,159	1,177	1,195	1,212	1,228
1,2	0,941	0,944	0,949	0,956	0,966	0,982	1,004	1,028	1,053	1,077	1,103	1,126	1,148	1,168	1,186	1,204	1,222	1,237
1,3	0,946	0,951	0,957	0,966	0,977	0,993	1,016	1,040	1,063	1,089	1,114	1,136	1,158	1,178	1,196	1,214	1,232	1,250
1,4	0,953	0,959	0,967	0,975	0,986	1,005	1,028	1,050	1,075	1,101	1,124	1,147	1,168	1,187	1,206	1,224	1,244	1,266
1,5	0,961	0,968	0,975	0,984	0,997	1,018	1,040	1,061	1,088	1,111	1,134	1,156	1,176	1,196	1,215	1,235	1,258	1,277
1,6	0,972	0,978	0,985	0,994	1,010	1,030	1,050	1,073	1,096	1,119	1,142	1,164	1,184	1,204	1,224	1,245	1,268	1,289

Note : Les valeurs recommandées sont celles qui ne sont pas inscrites dans les zones colorées en jaune.

Tableau 24 : Exemple de calcul de débit pour un déversoir rectangulaire à seuil épais

	Équation			
Configuration du déversoir	$h_1 = 0,40 \text{ m}$	$l = 0,50 \text{ m}$	$h_2 = 0,10 \text{ m}$	$l/p = 1,6667$
	$b = 10 \text{ m}$	$h_1/l = 0,80$	$p = 0,30 \text{ m}$	$h_1/p = 1,3333$
Vérification des limitations	Conforme au Tableau 22			
Détermination du débit	$Q = C \sqrt{2g} b h_1^{1,5}$ $C = 0,385 A_1, \text{ selon le Tableau 23, } A_1 = 1,043$ $Q = 0,4016 \times 4,43 \times 10 \times 0,40^{1,5}$ $Q = 4,5008 \text{ m}^3/\text{s} (16 202,98 \text{ m}^3/\text{h})$			

²⁵ Source : ONEMA, *Contrôle des débits réglementaires*

Écoulement noyé

L'utilisation du déversoir rectangulaire à seuil épais en écoulement noyé est possible si certaines conditions sont respectées. Ces conditions et les équations à appliquer sont décrites dans la norme ISO 3846.

Le déversoir à seuil épais...



L'ISO décrit 4 types : rectangulaire, arrondi, trapézoïdal et en V.

La hauteur d'eau correspond à la différence entre la crête et la surface de l'eau au point de mesure.

Le point de mesure se situe à 3-4x la hauteur d'eau maximale (h_{max}) admissible au déversoir.

Réaliser régulièrement une inspection du déversoir basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

3.3 ÉLÉMENTS SECONDAIRES

L'élément primaire seul permet d'obtenir une mesure ponctuelle de débit en convertissant la hauteur d'eau mesurée au point de mesure à l'aide de l'équation théorique ou des tables hauteur – débit. Par contre, la mesure directe en continu et l'enregistrement des hauteurs d'eau et des débits nécessitent l'installation d'un équipement supplémentaire : l'élément secondaire.

L'élément secondaire procède à la mesure d'une grandeur physique (ex. : distance, pression) correspondant à la hauteur d'eau au point de mesure de l'élément primaire, l'affiche, l'enregistre, la traite ou la transmet pour obtenir la valeur du débit en appliquant une relation hauteur – débit connue.

Dans un écoulement à surface libre, les éléments secondaires utilisés pour mesurer et convertir les signaux de l'élément primaire en débit sont des débitmètres.

3.3.1 Classification des éléments secondaires

La présente section fait référence aux appareils fréquemment rencontrés en milieux industriel et municipal, sans toutefois proposer une revue complète de tous les équipements disponibles sur le marché.

Les appareils de mesure du niveau se répartissent selon deux catégories : la détection de niveau et la mesure continue du niveau (Figure 41). Pour sa part, la détection de niveau indique l'atteinte d'une hauteur d'eau prédéfinie. Par exemple, il peut s'agir d'une hauteur de haut niveau fixée à 1 m, reliée à une alarme et servant à indiquer un risque de débordement d'un réservoir.

La mesure continue est quant à elle plus sophistiquée puisqu'elle se base sur un intervalle de mesure. Elle consiste par exemple à mesurer une hauteur d'eau se situant entre 0 et 30 cm plutôt qu'à considérer la mesure sur un seul point comme pour l'exemple de la détection du niveau d'eau à 1 m.

La Figure 41 illustre aussi certains principes de mesure (pression différentielle et temps de parcours) qui régissent les appareils de mesure continue du niveau. Ces derniers sont décrits plus en détail dans les sections suivantes.

Des débitmètres hauteur – vitesse pouvant être utilisés avec ou sans élément primaire sont aussi disponibles sur le marché. C'est le cas, par exemple, des débitmètres hauteur – vitesse Doppler immergés ou encore des débitmètres hauteur – vitesse radar sans contact, dont la mesure combinée de la hauteur d'eau et de la vitesse permet d'obtenir une mesure du débit.

Ces équipements sont utiles lorsque l'installation d'un élément primaire est impossible ou lorsque la conduite peut présenter des inversions de courant et des mises en charge passagères. Ils peuvent aussi être utilisés pour établir une mesure du débit ponctuelle, comme dans le cas d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit. La section 7 décrit plus en détail ces équipements dans le cadre d'une vérification de l'exactitude.

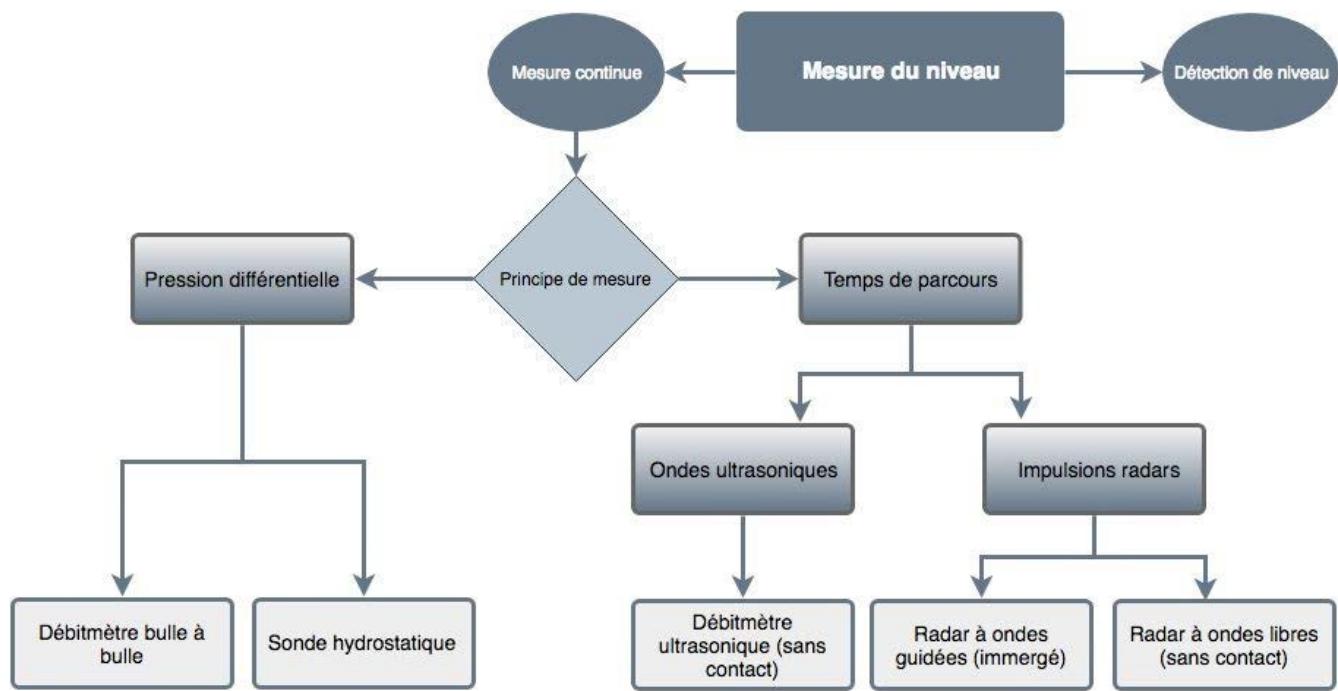


Figure 41 : Classification des appareils de mesure de niveau

3.3.2 Appareils de mesure basés sur la pression différentielle

3.3.2.1 Débitmètre bulle à bulle

Description et principe de fonctionnement

Le débitmètre bulle à bulle se compose d'une canne de bullage (tube pneumatique) installée à la section de mesurage et reliée à un boîtier installé à l'extérieur de l'élément primaire (ex. : sur support mural) (Figure 42).

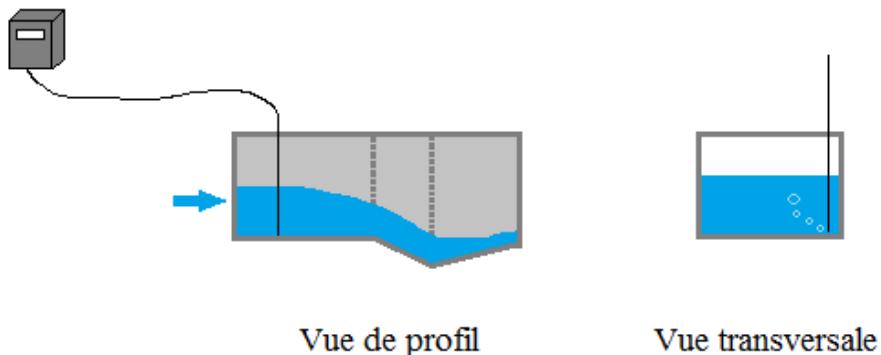


Figure 42 : Exemple d'installation du boîtier d'un débitmètre bulle à bulle et de la canne de bullage dans un canal Parshall

Le compresseur interne du boîtier pousse de l'air dans la canne de bullage. La profondeur de l'eau est déterminée par la mesure de la pression nécessaire pour forcer l'air à sortir du tube en

s'opposant à la pression de l'eau. La différence de pression, mesurée par le capteur hydrostatique, est proportionnelle à la mesure de niveau d'eau. La profondeur d'eau ainsi obtenue est convertie en débit sur la base des tables hauteur – débit intégrées à l'appareil, et sélectionnées selon le type d'élément primaire utilisé.

Conditions d'installation

Les spécifications techniques de l'appareil sélectionné doivent être prises en considération en fonction des caractéristiques de l'effluent à mesurer :

- Température d'entreposage et d'utilisation (ex. : $-30^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 60^{\circ}\text{C}$);
- Longueur maximale de la tubulure entre le transmetteur et le point de mesure (ex. : max. 30 m);
- Hauteurs d'eau minimale et maximale (ex. : 0–30 mm / 0-500 mm);
- Vitesse d'écoulement (ex. : $\leq 1,5 \text{ m/s}$);
- Matières en suspension (ex. : éviter les effluents très chargés).

Les conditions suivantes sont aussi à respecter lors de l'installation de l'appareil :

- Le boîtier n'est pas exposé aux vibrations, aux intempéries et au rayonnement direct du soleil;
- La position de la base de la canne de bullage correspond à la hauteur zéro au point de mesure du canal ou au déversoir en place;
- Le tube de la canne de bullage ne doit pas être plié, tendu ou comprimé pour favoriser le libre passage de l'air;
- La canne de bullage doit être fixée en bordure du canal, le plus près possible de la paroi du canal (de 2 à 3 cm du bord) pour limiter les perturbations de l'écoulement;
- La partie biseautée (extrémité de la canne de bullage) doit être placée vers l'intérieur du canal (Figure 43);
- La fréquence de bullage est réglée selon un débit d'air d'une bulle d'air par seconde;
- La mesure dans un puits de mesurage est à privilégier, car cela permet d'éviter complètement des perturbations que pourrait engendrer la canne de bullage et de simplifier le réglage du « zéro ». Le niveau zéro dans la section de mesure doit être pris en considération lors de l'installation dans le puits de mesurage (Figure 12).

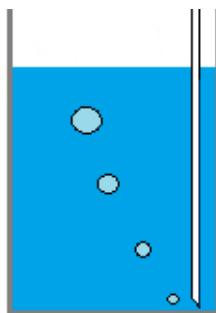


Figure 43 : Installation de la canne de bullage, partie biseautée vers l'intérieur du canal

3.3.2.2 Sonde hydrostatique

Description et principe de fonctionnement

La sonde hydrostatique est immergée au fond du canal et mesure la pression (p) pour déterminer le niveau d'eau (h) (Figure 44) selon la formule suivante :

$$h = \frac{p}{\rho \times g} \quad (16)$$

Où h hauteur d'eau;

p pression totale (pression hydrostatique + pression atmosphérique);

ρ densité du liquide;

g accélération de la pesanteur.

La sonde est munie d'une cellule de mesure céramique qui détecte les changements de pression hydrostatique correspondant aux variations de hauteur d'eau, tout en détectant et en compensant les modifications de pression atmosphérique qui résultent des conditions météorologiques changeantes lorsque le capteur est équipé d'un dispositif adapté de mise à la pression atmosphérique. Elle permet une mesure précise du niveau d'eau dans la section de mesure, quelles que soient les conditions environnantes (ex. : vent, mousse, etc.). La sonde est associée à un transmetteur qui fait la conversion de la hauteur mesurée en débit.

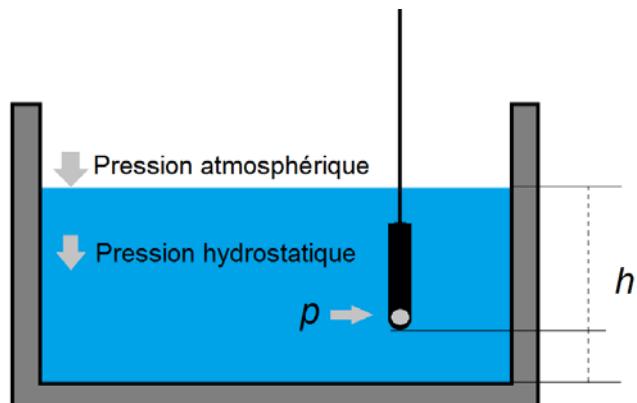


Figure 44 : Fonctionnement d'une sonde hydrostatique

Conditions d'installation

Les spécifications techniques de l'appareil doivent être prises en considération. L'appareil sélectionné doit répondre aux caractéristiques de l'effluent (ex. : intervalle de mesure, matières en suspension, etc.). Les conditions d'installation peuvent varier selon les fabricants, mais les éléments suivants doivent être respectés :

- Ajuster l'intervalle de mesure des hauteurs d'eau *in situ* afin qu'il corresponde à l'étalonnage de l'élément secondaire;
- Fixer solidement la sonde à l'aide de pinces de suspension ou autre équipement proposé par le fabricant;

- Installer le boîtier de mise à la pression atmosphérique à l'emplacement le plus protégé possible des risques de submersion;
- Installer l'extrémité de la sonde de pression (cellule) à la profondeur d'écoulement « zéro » de la section de mesure de l'élément primaire. L'installation de la sonde en fond de canal est toutefois à éviter lorsqu'elle est située en amont d'un déversoir du fait de l'accumulation de dépôts. De plus, la sonde peut être décollée du fond du canal (Figure 44) pour qu'il n'y ait pas de risque de bris, à la condition que la hauteur (h) inscrite sur l'appareil soit ajustée;
- Protéger la sonde à l'intérieur d'un puits de protection (ex. : tuyau de PVC);
- Favoriser l'installation de la sonde dans un puits de mesurage pour limiter l'effet des mouvements rapides de vitesse sur l'exactitude de la mesure;
- Assurer l'accès facile pour la vérification et l'étalonnage.

3.3.3 Appareils de mesure basés sur le temps de parcours

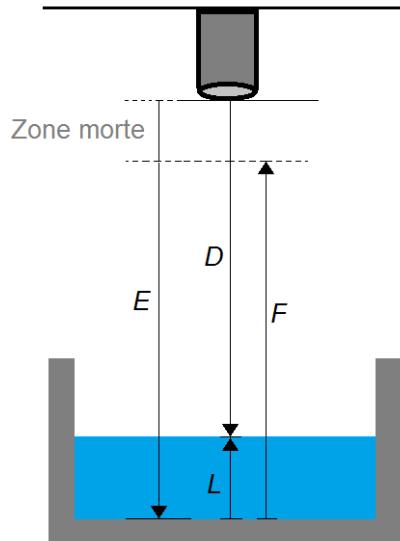
Un appareil fonctionnant sur le principe du temps de parcours ne mesure pas directement le niveau d'eau, mais plutôt la distance entre le capteur et un point de référence. Le niveau d'eau est donc obtenu par soustraction de la distance entre le capteur et la surface de l'écoulement (Figure 45).

Ainsi, la distance (D) mesurée par l'appareil est proportionnelle au temps de parcours (t) de l'impulsion, où (c) est la vitesse du son (330 m/s) dans le cas d'un capteur ultrasonique ou la vitesse de la lumière (300 000 km/s) pour un capteur radar (le radar propage des impulsions radioélectriques dans l'air à la vitesse de la lumière), selon l'équation suivante :

$$D = c * \frac{t}{2} \quad (17)$$

La distance E est connue par le système (elle correspond au niveau zéro), il est donc possible de calculer ainsi la hauteur d'eau L :

$$L = E - D \quad (18)$$



<i>D</i>	Distance entre le capteur ultrasonique et la surface de l'écoulement
<i>E</i>	Niveau zéro
<i>F</i>	Étendue de mesure
<i>L</i>	Hauteur d'eau

Figure 45 : Mesure de niveau par capteur ultrasonique

3.3.3.1 Débitmètre ultrasonique

Description et principe de fonctionnement

Le capteur ultrasonique suspendu au-dessus de l'écoulement émet des impulsions sonores en direction de la surface de l'écoulement, où elles sont réfléchies et à nouveau reçues par le capteur (Figure 45). Le temps écouté entre les signaux transmis et renvoyés détermine la hauteur d'eau.

Connaissant l'élément primaire utilisé (ex. : canal Parshall, déversoir, etc.), on détermine le débit selon la hauteur d'eau, en utilisant l'une des conversions de débit intégrées à l'appareil ou une relation hauteur – débit.

Conditions d'installation

Les spécifications techniques de l'appareil sélectionné doivent être prises en considération. Cet appareil doit répondre aux caractéristiques de l'effluent (ex. : intervalle de mesure, température, condensation, présence de mousse, etc.). Les conditions d'installation peuvent varier selon les fabricants, mais les éléments suivants doivent être respectés :

- Sélectionner un appareil dont l'intervalle de mesure (ex. : 0,2 - 4 m / 0 - 3 m, etc.) correspond aux hauteurs admissibles à l'élément primaire;
- Respecter l'emplacement du point de mesure de l'élément primaire;

- Éviter les écoulements présentant de la mousse et des débris flottants ainsi que des environnements présentant une forte condensation;
- Vérifier que les bords de la section de mesure ne faussent pas les lectures (ex. : dans le cas d'un canal étroit);
- Installer le capteur en position centrée par rapport aux bords de la section de mesure (Figure 46 a et non b);
- Orienter le capteur perpendiculairement à la surface de l'eau;
- Positionner le capteur pour que la mesure puisse s'effectuer à toutes les hauteurs d'eau, sans restriction causée par la zone morte (Figure 46 c);
- Maintenir l'espace libre entre le capteur et la surface de l'eau pour ne pas obstruer le déplacement des échos (ex. : éviter la présence de tuyaux, de structures, etc.);
- Respecter la distance maximale entre le boîtier (transmetteur) et le capteur;
- Lorsque possible, installer le capteur au-dessus d'un puits de mesurage pour réduire les effets des turbulences à la surface de l'écoulement;
- Éviter d'installer le boîtier (transmetteur) à la lumière directe du soleil pour protéger le matériel électronique contre les dommages dus à la surchauffe, à la condensation et aux intempéries.

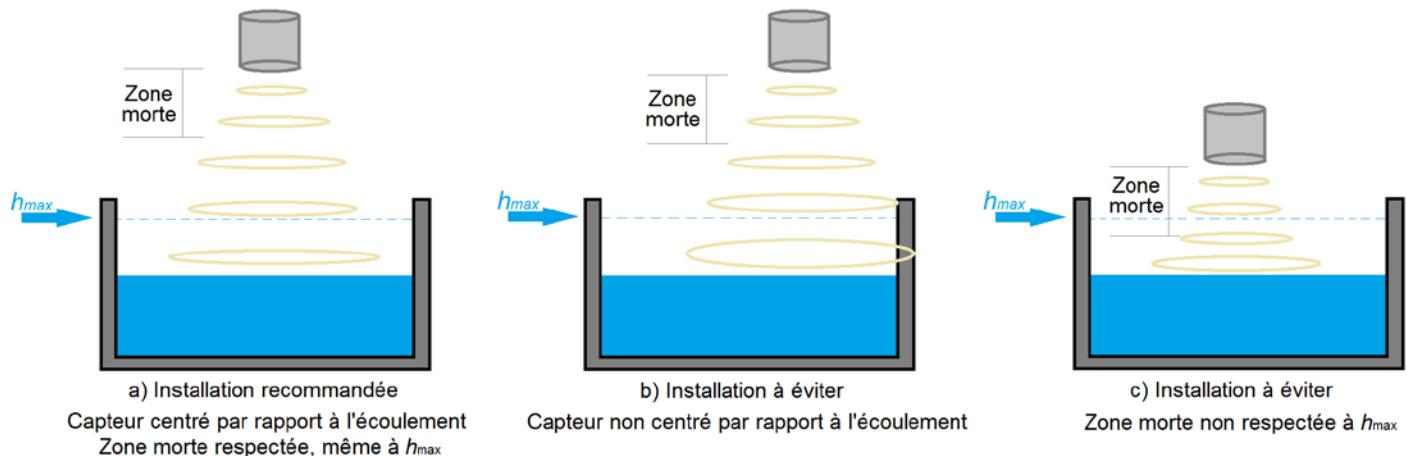


Figure 46 : Exemples d'installation d'un capteur ultrasonique

3.3.3.2 Appareil radar

Description et principe de fonctionnement

La mesure de niveau par appareils radars s'effectue selon deux méthodes, soit par des ondes libres sans contact ou par des ondes guidées immergées (aussi nommées filoguidées). Dans le premier cas, le capteur est installé au-dessus de l'écoulement (Figure 47). L'appareil radar guidé comporte pour sa part une tige ou un câble en contact avec le liquide (Figure 48).

Radar à ondes libres sans contact

Préalablement à son utilisation, on ajuste l'appareil en entrant le niveau zéro (E) et le niveau

maximal correspondant à l'étendue de mesure (F) (Figure 47). Théoriquement, il n'y a pas de zone morte pour ce type d'équipement, la mesure étant possible jusqu'à l'antenne. En pratique, une distance de blocage (DB) prédéfinie, dans laquelle le signal n'est pas analysé, est possible. Cette zone peut être utilisée pour supprimer les signaux parasites à proximité de l'antenne, comme les effets de la condensation.

Des impulsions radars envoyées par l'antenne sont réfléchies par la surface de l'écoulement et à nouveau détectées par l'antenne du radar. Le microprocesseur évalue les signaux et identifie l'écho de niveau engendré par la réflexion des ondes radars sur la surface de l'écoulement. Le temps de parcours de l'impulsion radar réfléchie est directement proportionnel à la distance parcourue.

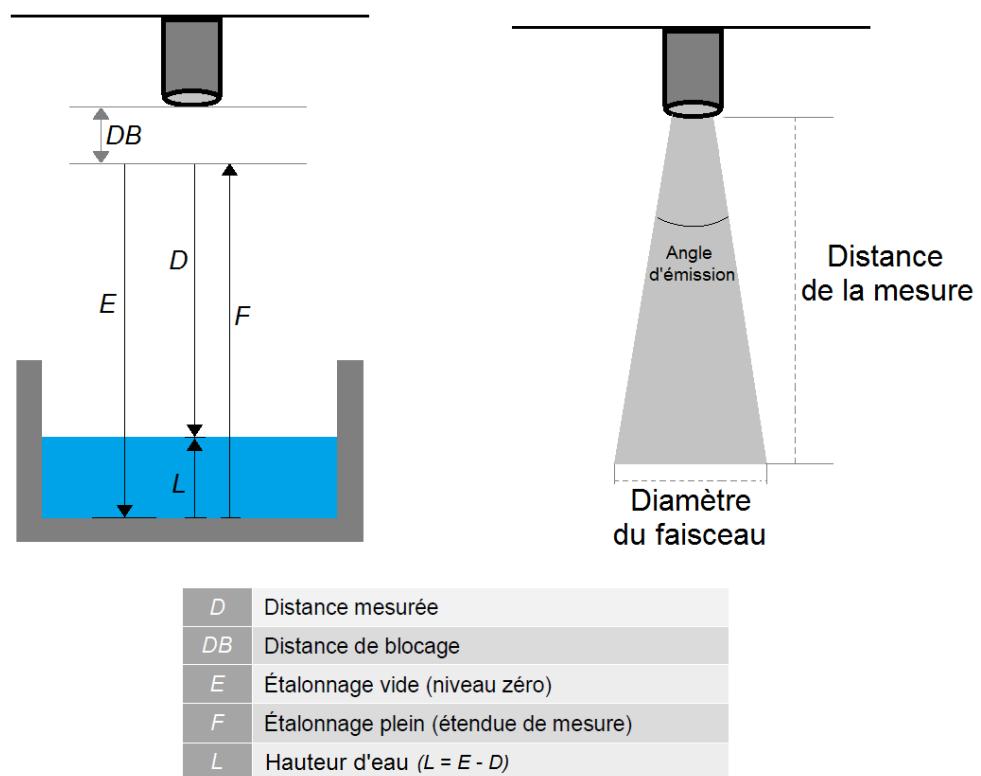


Figure 47 : Mesure du niveau par radar à ondes libres

Radar à ondes guidées immergées

Les impulsions sont propagées le long de la tige ou du câble en acier inoxydable. Lorsque les impulsions atteignent la surface de l'écoulement, une partie de l'énergie de l'impulsion s'y reflète et retourne au circuit électronique (Figure 48). Le temps de propagation entre l'émission et la réception des signaux est proportionnel au niveau d'eau.

L'intervalle de mesure de cet appareil dépend de la longueur de la sonde, et il demeure possible de la raccourcir en cas de besoin.

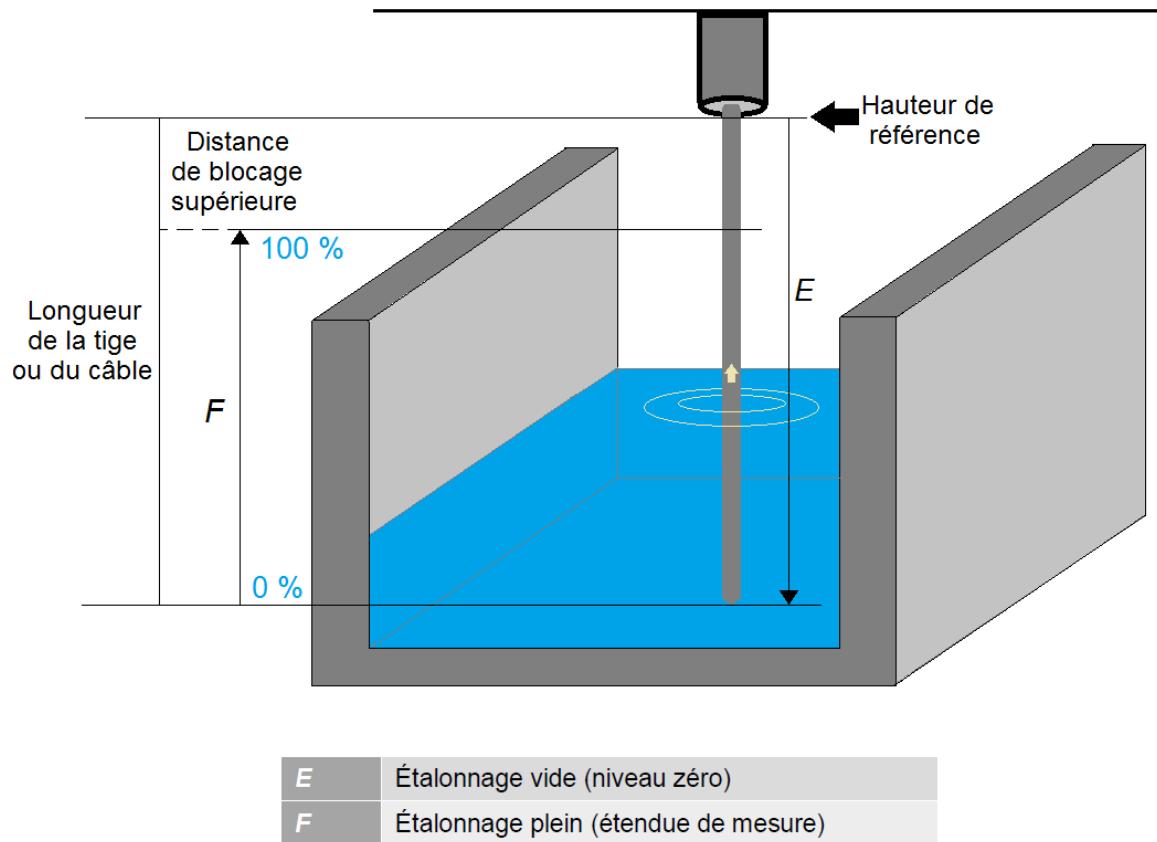


Figure 48 : Mesure de niveau par radar à ondes guidées immersées

Conditions d'installation

Les conditions d'installation peuvent varier selon les fabricants, mais les éléments suivants doivent être respectés pour les appareils radars à ondes libres sans contact et à ondes guidées immersées :

- Installer le radar au point de mesure de l'élément primaire;
- Sélectionner un appareil dont les spécifications techniques correspondent aux conditions *in situ* (ex. : température, pression, etc.);
- Établir avec précision les hauteurs *E* et *F*;
- Respecter les distances de blocage supérieure (entre la hauteur de référence du radar et le niveau maximal atteignable) et inférieure, lorsque requis;
- Pour un montage à l'extérieur, utiliser si possible un couvercle de protection contre les intempéries.

Les points suivants s'appliquent au radar à ondes libres sans contact :

- Respecter la largeur minimale de la section de mesure (ex. : 0,5 m) pour éviter la réflexion des ondes par les bords du canal plutôt que par la surface de l'écoulement;
- Privilégier des surfaces d'écoulement calmes, sans agitation;

- Éviter les liquides ayant de mauvaises propriétés de réflexion;
- Éviter la formation de dépôts, la forte condensation, la formation de mousse et le gel du capteur;
- Orienter l'antenne perpendiculairement à la surface de l'écoulement.

Dans le cas d'un radar à ondes guidées immergées, les éléments suivants sont à considérer :

- Respecter la distance minimale entre l'appareil et le bord du canal (ex. : 10 cm) et éviter l'apparition de dépôts sur les parois, qui feraient réduire cet espace;
- Éviter le contact entre la sonde et le fond de la section de mesure et respecter les distances minimales fixées par le fabricant;
- Installer verticalement la tige ou le câble pour qu'il soit placé perpendiculairement à la surface de l'écoulement.

3.3.4 Comparaison des éléments secondaires

Le choix d'un élément secondaire se base sur les spécifications techniques de l'appareil ainsi que sur les conditions *in situ* (ex. : type d'élément primaire, étendue de mesure, présence de vapeur, de mousse, caractéristiques de l'effluent, etc.). Le Tableau 25 compare les éléments secondaires décrits précédemment sur la base de certaines conditions d'utilisation.

Tableau 25 : Comparaison des éléments secondaires

Conditions d'utilisation	Débitmètre bulle à bulle	Sonde hydrostatique	Débitmètre ultrasonique	Radar à ondes libres	Radar à ondes guidées
Types d'éléments primaires	Non influencé	Canaux > 0,015 m (sinon, trop de restriction)	Lectures pouvant être faussées par les bords du canal si étroit	Lectures pouvant être faussées par les bords du canal si étroit ($\leq 0,5$ m)	Non influencé, sauf si le capteur cause une obstruction pour un canal étroit
Vent, vapeur condensation	Non influencé	Non influencée	À éviter	Peu influencé	Non influencé
Température ambiante	Les équipements disponibles sont généralement en mesure de répondre aux températures ambiantes des secteurs industriel et municipal (ex. : de -20 à +60 °C). Se référer aux spécifications des équipements pour sélectionner celui qui correspond le mieux aux conditions <i>in situ</i> (ex. : installation extérieure en hiver). Les capteurs ultrasoniques sont influencés par les variations de température et le gradient de température entre le capteur et la surface de l'eau.				
Turbulences	Non influencé; mais fixer solidement	Non influencée; mais fixer solidement	À éviter	Utilisation possible	Bonne tolérance
Mousse ou débris à la surface de l'écoulement	Non influencé	Non influencée	À éviter	Non ou peu influencé (selon épaisseur et matériau des objets flottants)	L'onde canalisée sur la tige traverse plus facilement la vapeur et la mousse que le radar à ondes libres

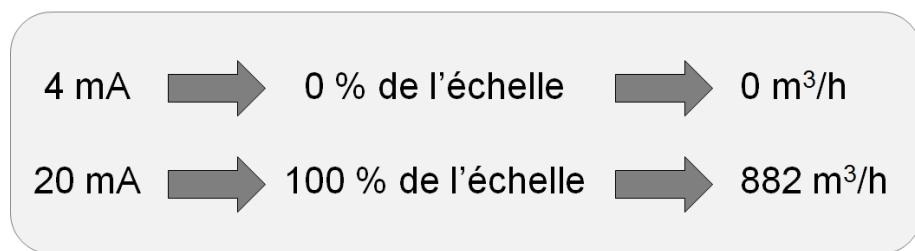
Conditions d'utilisation	Débitmètre bulle à bulle	Sonde hydrostatique	Débitmètre ultrasonique	Radar à ondes libres	Radar à ondes guidées
Particules en suspension	Utilisation possible	Non recommandée pour liquide très chargé en matières en suspension	Non influencé	Non influencé	Non influencé
Étendue de mesure de la hauteur d'eau	Variables en fonction des fabricants et des modèles. Se référer aux spécifications des équipements pour sélectionner celui qui correspond le mieux aux conditions <i>in situ</i> .				
Étendue de mesure de la vitesse	Vitesses < 1,5 m/s sinon puits de mesurage requis	Non influencée	Non influencé	Non influencé	Non influencé
Envasement	Non influencé	Risque d'encrassement du capteur	Non influencé	Non influencé	Non influencé
Maintien de l'intégrité de l'équipement	Non influencé; pas de contact entre la cellule de mesure et le liquide (canne de bullage)	Capteur pouvant être endommagé par un produit chimique ou encrassé par les débris	Non influencé, sans contact avec l'écoulement	Non influencé, sans contact avec l'écoulement	Non influencé, mais nature du liquide à considérer
Entretien	Faible coût de la partie exposée; maintenance du déshydratant; nettoyage régulier de la canne de bullage (encrassement = risque de panne pneumatique ou erreurs de mesure)	Nettoyage régulier du capteur pour éviter la dérive des lectures	Peu d'entretien, sans contact	Peu d'entretien, sans contact	Éviter encrassement du câble ou de la tige qui peut amortir le signal, fausser ou réduire l'intervalle de mesure
Exactitude (si bonnes conditions d'installation)	Variables selon fabricant				
	De 0,1 à 1 % de l'intervalle de mesure	De 0,1 à 2 % de l'intervalle de mesure	De 0,05 à 3 % de l'intervalle de mesure +/- 2 à 6 mm	0,1 % de l'intervalle de mesure +/- 1 à 8 mm	De +/- 1 à 3 mm

3.3.5 Programmation de l'élément secondaire

Ces appareils se basent sur un signal de tension analogique puisqu'ils représentent une grandeur physique par le biais d'une autre grandeur. Par exemple, un débitmètre bulle à bulle indique la profondeur de l'eau (grandeur) en mesurant la pression (autre grandeur) nécessaire pour forcer l'air à sortir du tube en s'opposant à la pression de l'eau.

Le signal analogique de l'appareil est transmis au moyen de la boucle de courant 4-20 mA. Cette boucle permet de transmettre le signal analogique sur une grande distance sans perte ou modification.

Le capteur mesure une grandeur physique (ex. : pression). L'émetteur de courant 4-20 mA convertit la valeur mesurée par le capteur en un courant compris dans l'intervalle 4-20 mA. Le courant de 0 à 4 mA de la boucle sert à l'alimentation du circuit émetteur (l'émetteur doit donc consommer moins de 4 mA). Si la lecture est de 0 mA, la boucle de courant ne fonctionne plus ou elle comporte une erreur. Donc, la valeur minimale de l'échelle a un courant de 4 mA, alors que la valeur maximale de l'échelle a un courant de 20 mA. L'étendue de mesure de l'échelle se base sur la table hauteur – débit de l'élément primaire en place. Par exemple, la configuration de la sortie analogique pour un canal Parshall de 0,229 m (9 po) se fait ainsi :



Pour fournir des valeurs représentatives de l'écoulement, le débitmètre doit prendre au moins une mesure par minute. Au-delà de cet intervalle, la mesure devient ponctuelle et mène à une estimation. Les débitmètres vendus sur le marché répondent sans problème à ce critère, la plupart prenant plusieurs mesures par minute, voire par seconde.

Les mesures (ex. : hauteurs et débits minimal, maximal et moyen, totalisation) doivent être disponibles par le biais d'un enregistreur ou transmis au système informatique.

3.3.6 Entretien, vérification et étalonnage

Lors de la mise en fonction de l'élément secondaire et lors des vérifications de routine, certaines précautions doivent être prises :

- Nettoyer le fond et les parois du canal ainsi que la section de mesurage où est installé l'élément secondaire;
- Enlever tout instrument (sonde, tubulure, etc.) ou autre objet pouvant interférer avec le signal de l'élément secondaire;
- Nettoyer le capteur de l'élément secondaire pour éviter l'envasement ou l'encrassement de ce dernier;
- S'assurer que l'étendue de mesure du débitmètre correspond à l'étendue de mesure de l'élément primaire en place;
- Synchroniser les différents équipements (ex. : heure, date, étendue de mesure, etc.);
- Vérifier le zéro de l'appareil;
- Vérifier l'exactitude de la mesure de débit de l'élément secondaire selon le mode de

mesure de référence mis en place. Cette valeur de référence est considérée comme la valeur vraie. Par exemple, il peut s'agir :

- D'une mesure manuelle à l'aide d'une règle installée de façon permanente au point de mesure (Figure 49);



Vue en plan

Règle fixée au centre du canal d'approche et au point de mesure d'un canal Palmer-Bowlus



Vue en plan

Règle fixée sur la paroi au 2/3 de la section A d'un canal Parshall

Figure 49 : Exemples d'installations de règles permanentes

- De l'utilisation d'une plaque de référence temporaire ou installée de façon permanente (Figure 50). Il est possible de fixer une plaque de référence munie d'un système de rotation permettant de la tourner sous la sonde ultrasonique lors de la vérification. Qu'elle soit permanente ou amovible, la plaque de référence doit être de niveau et solidement maintenue lors de l'ajustement de l'élément secondaire. La hauteur de la plaque doit être connue précisément.

Bien que la grandeur obtenue lors d'une vérification à l'aide d'une règle ou d'une plaque de référence soit une hauteur d'eau, elle doit être convertie en débit pour qu'on puisse vérifier l'écart entre le débit obtenu simultanément par l'appareil et la méthode de vérification. L'écart de débit constaté devrait être le plus près possible de zéro, et en tout temps inférieur à 5 %. Dans le cas contraire, l'ajustage de l'élément secondaire est requis.

L'exemple suivant, basé sur l'équation théorique d'un canal Parshall de 0,914 m, démontre que l'écart maximal de 5 % peut être respecté lorsque la comparaison est faite avec la hauteur d'eau, mais qu'il peut être supérieur à 5 % lorsque la comparaison est faite à partir des débits :

Mesure manuelle de la hauteur d'eau : 0,355 m → 1 553 m³/h

Mesure de la hauteur d'eau avec appareil : 0,370 m → 1 657 m³/h

$$\% \text{ écart sur les hauteurs} = \frac{0,355 \text{ m} - 0,370 \text{ m}}{0,355 \text{ m}} \times 100 = 4,23 \%$$

$$\% \text{ écart sur les débits} = \frac{1\,553 \text{ m}^3/\text{h} - 1\,657 \text{ m}^3/\text{h}}{1\,553 \text{ m}^3/\text{h}} \times 100 = 6,70 \%$$

- Vérifier la transmission des données vers le système informatique; l'écart entre la valeur affichée à l'appareil local et au système informatique devrait être le plus près possible de zéro.



Ajustement et utilisation
d'une plaque de référence temporaire

Exemple d'installation d'une plaque de référence
permanente et amovible

Figure 50 : Exemples de plaques de référence

Bien que l'exactitude des éléments secondaires soit très grande et que les dérèglements en conditions de laboratoire soient rares, il est important de noter que les conditions d'installation et d'utilisation sur le terrain peuvent mettre à l'épreuve les performances de l'appareil. Ainsi, la vérification de l'exactitude et l'ajustement doivent idéalement être effectués hebdomadairement pour maintenir une exactitude acceptable. L'entretien, l'ajustage et l'étalonnage de l'appareil doivent être confiés à du personnel qualifié pour qu'il y ait le moins possible d'incertitude reliée au facteur humain.

Un exemple d'aide-mémoire à utiliser lors de l'inspection d'un élément secondaire est disponible à l'annexe 3.

L'élément secondaire...



Il s'agit habituellement d'un débitmètre. Il effectue la mesure d'une grandeur physique correspondant à la hauteur d'eau et la transforme en débit en appliquant une relation hauteur – débit connue.

Le choix de l'appareil doit prendre en considération les caractéristiques de l'effluent (ex. : présence de MES, mousse, etc.).

Les conditions d'installation et d'utilisation des appareils sont variables en fonction de leurs principes de fonctionnement et doivent respecter les recommandations du fabricant.

La vérification régulière de l'exactitude de la mesure de l'appareil (écart \leq 5 %) et de la transmission des données (écart le + près possible de 0 %) sont requises.

Réaliser régulièrement une inspection et une vérification de l'exactitude de l'appareil basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

4 INSTALLATION DE MESURE DANS UN ÉCOULEMENT SOUS PRESSION

4.1 GÉNÉRALITÉS

Un écoulement est dit sous pression lorsque le liquide est confiné dans une conduite fermée et qu'il est soumis à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Comme pour les installations de mesure du débit dans un écoulement à surface libre, le système de mesure en conduite fermée est généralement composé d'un élément primaire et d'un élément secondaire. L'élément primaire est la composante qui produit un signal proportionnel au débit qui est extrait, mesuré et converti en un signal de sortie normalisé par l'élément secondaire. L'élément primaire correspond donc au tube de mesurage, aux dispositifs servant à créer l'effet recherché (signal) et aux électrodes de mesurage du signal. L'élément secondaire correspond pour sa part à l'appareil affichant et transmettant les données acquises. Contrairement à ce qui a trait à l'installation dans un écoulement à surface libre, les éléments primaire et secondaire sont ici plus difficiles à distinguer visuellement l'un de l'autre.

Sur une conduite fermée, les installations de mesure du débit sont des débitmètres. Un débitmètre, selon la technologie mise en œuvre, mesure différents paramètres (aussi appelés grandeurs) tels que la pression, la tension électrique induite, le temps de parcours d'une onde ultrasonique, etc. pour obtenir la valeur de vitesse de l'écoulement dans la conduite. Par la suite, cette valeur permet à l'appareil de calculer le débit à l'aide des équations appropriées à chacune des méthodes utilisées. Ces équipements permettent le relevé des débits instantanés ainsi que la totalisation.

4.2 CLASSIFICATION DES DÉBITMÈTRES

Selon leur mode de fonctionnement, certains débitmètres s'installent à l'intérieur de la conduite (ex. : débitmètre à organe déprimogène, débitmètre à insertion, débitmètre mécanique), freinant plus ou moins l'écoulement et entraînant une perte de charge (perte de pression) dans celle-ci, alors que d'autres s'installent à l'extérieur et ne modifient pas l'écoulement.

Les débitmètres à insertion calculent le débit par le moyen d'une sonde insérée dans la conduite, mais le principe de mesure peut varier en fonction des types de débitmètres. Pour leur part, les débitmètres ultrasoniques, électromagnétiques et ceux basés sur la pression différentielle se présentent sous une version non intrusive ou à insertion (Figure 51).

Les grandeurs mesurées par les débitmètres se basent principalement sur le débit volumique (Q_v), à l'exception du débitmètre Coriolis, qui se base sur le débit massique (Q_m).

Pour la plupart des principes de mesure, il s'agit de déterminer la vitesse moyenne de l'écoulement, de manière directe ou indirecte (par l'utilisation d'une autre grandeur liée). La Figure 51 présente une classification des différents équipements traités dans ce document en fonction de leur principe de mesure.



Figure 51 : Classification des débitmètres sur conduite fermée sous pression en fonction de leur principe de mesure

4.3 EXACTITUDE

Les débitmètres sur conduite fermée sous pression sont réputés pour offrir une grande exactitude de mesure. L'erreur de mesure (souvent identifiée par le terme précision) fournie par le fabricant est théorique et elle se base sur une installation optimale.

Les erreurs de mesure pour ce type d'appareil varient généralement entre 0,5 et 3 %. Ainsi, afin que ce degré de précision soit maintenu, les conditions d'utilisation *in situ* de l'appareil doivent correspondre aux conditions de référence et être soumises aux limites fixées par le fabricant pour chacune des grandeurs concernées. Il est donc essentiel de sélectionner l'équipement le mieux adapté aux caractéristiques du liquide ainsi qu'aux conditions *in situ*. Son installation, son utilisation et son entretien doivent aussi répondre aux recommandations du fabricant, aux normes ISO applicables et aux règles de l'art.

4.4 TYPES D'APPAREILS CLASSÉS SELON LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

4.4.1 Pression différentielle

Cette section regroupe les équipements dont le principe de mesure se base sur la pression différentielle, et elle se divise en deux catégories, soit les débitmètres à organe déprimogène et les débitmètres à insertion.

4.4.1.1 Description et fonctionnement des débitmètres à organe déprimogène

Ce type de débitmètre base sa mesure de vitesse sur la mesure de la pression différentielle. Le fluide doit passer par une restriction géométrique (nommé « organe déprimogène »), ce qui crée une différence de pression entre les conditions en amont et en aval de la restriction.

Compte tenu du fait que la quantité de fluide reste la même en amont et en aval de la restriction (principe de conservation de l'énergie) et que le fluide doit circuler en totalité pendant la même durée, la vitesse de passage du fluide au niveau de la restriction doit donc nécessairement augmenter. Ainsi, puisque la vitesse varie en fonction du débit, un débit plus élevé signifie une plus grande vitesse et donc une plus grande différence de pression en amont et en aval de la restriction. Cette variation de pression permet de déduire le débit volumique.

Ce débitmètre est donc constitué de deux dispositifs (Figure 52) :

- Un organe déprimogène responsable de la différence de pression (Δp) (élément primaire) (ex. : diaphragme, Venturi, etc.);
- Un capteur de pression différentielle (élément secondaire) permettant de mesurer la différence de pression et de donner une valeur de débit.

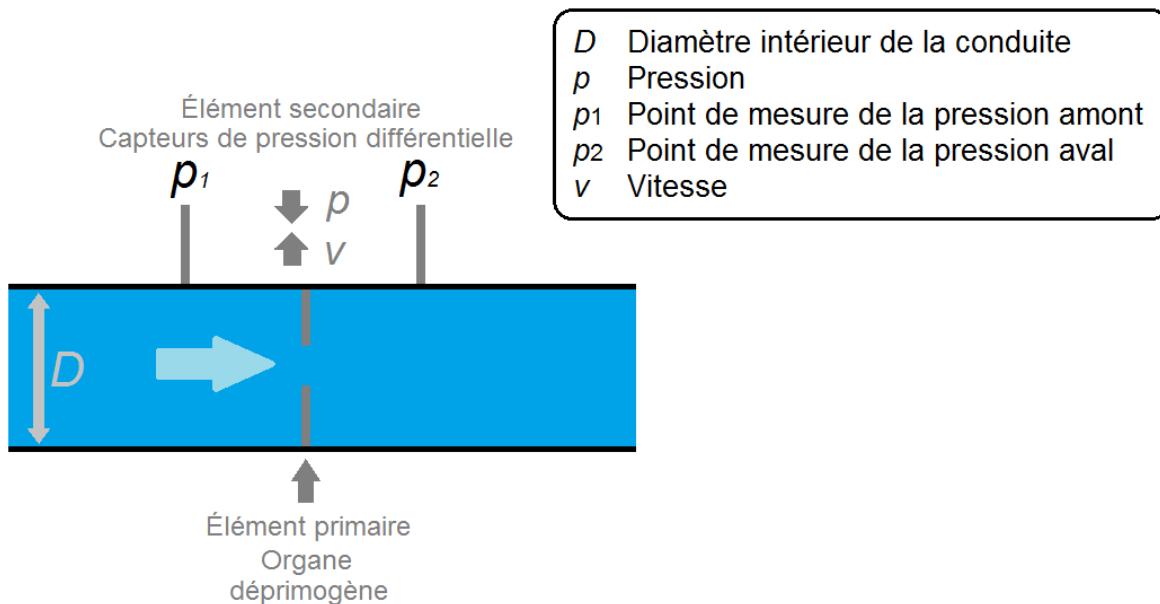


Figure 52 : Illustration générale d'un débitmètre à pression différentielle impliquant la présence d'un organe déprimogène

Les débitmètres à organe déprimogène se répartissent en quatre catégories et se composent des éléments suivants :

Tube de Venturi (parfois nommé tube de Herschel) (Figure 53) :

- Convergent d'entrée (partie décroissante), où se produit l'accélération du fluide;
- Col cylindrique;
- Évasement divergent (partie croissante), où le fluide retrouve sa pression d'origine;
- Prises de pression en amont et au niveau de la restriction (col cylindrique).

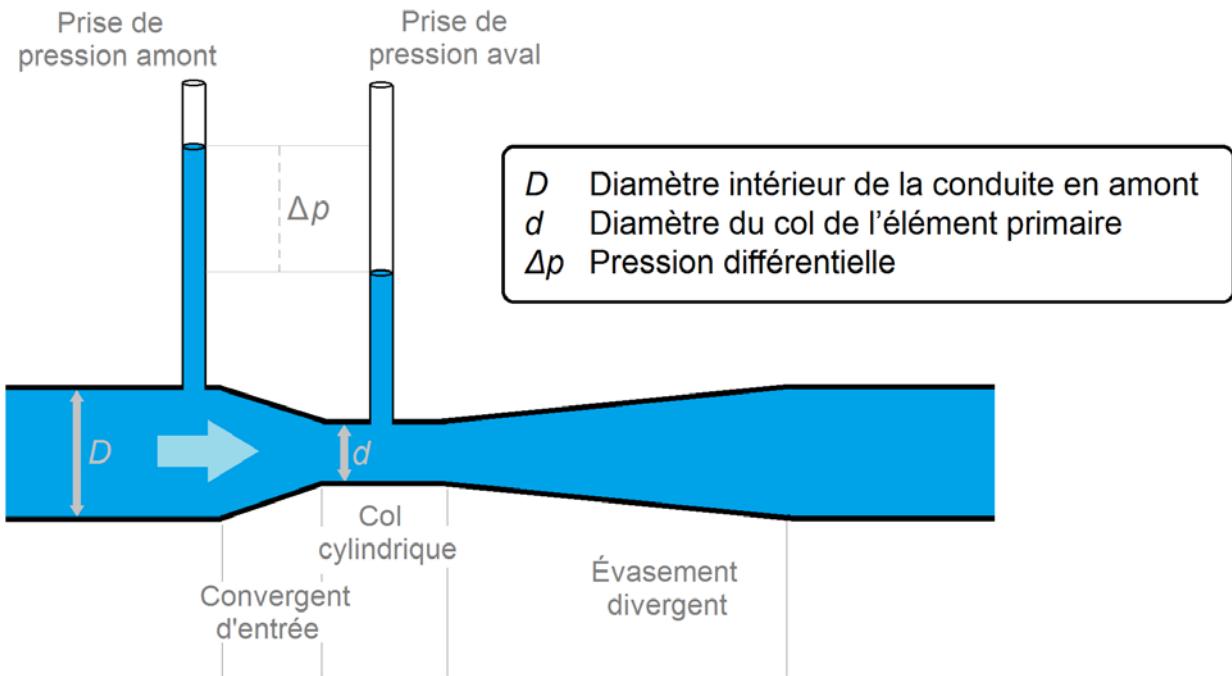


Figure 53 : Tube de Venturi (ou de Herschel)

Diaphragme (ou plaque à orifice) (Figure 54) :

- Plaque rigide, en acier inoxydable, de faible épaisseur, et percée d'un orifice d'un diamètre et d'une forme bien définie (forme circulaire, carrée, ovale, triangulaire, etc.);
- Cette plaque est introduite dans la canalisation perpendiculairement au sens de l'écoulement;
- Prises de pression en amont et en aval de la plaque.

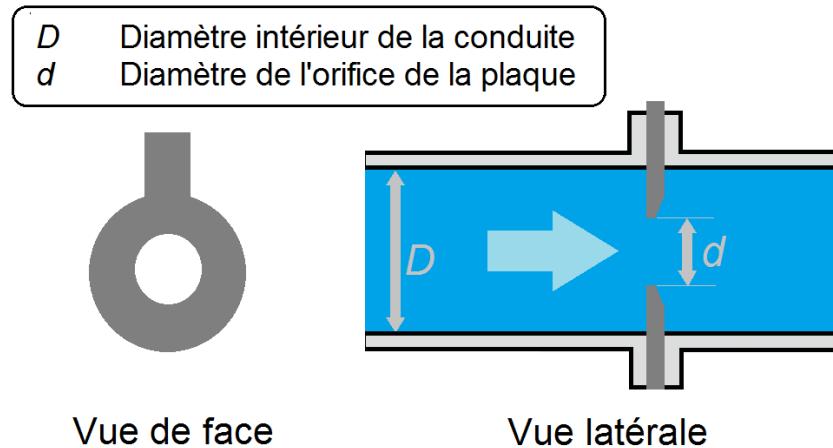


Figure 54 : Diaphragme (plaqué à orifice)

Tuyère (et Venturi-tuyère) (Figure 55) :

- Convergent arrondi;
 - Col cylindrique suivant la ligne de la conduite;
 - Ne comporte pas de section divergente;
 - Prises de pression en amont et au niveau de la restriction (col cylindrique);
 - Considérée comme une variante du tube de Venturi et présente des caractéristiques intermédiaires entre le tube de Venturi et le diaphragme.

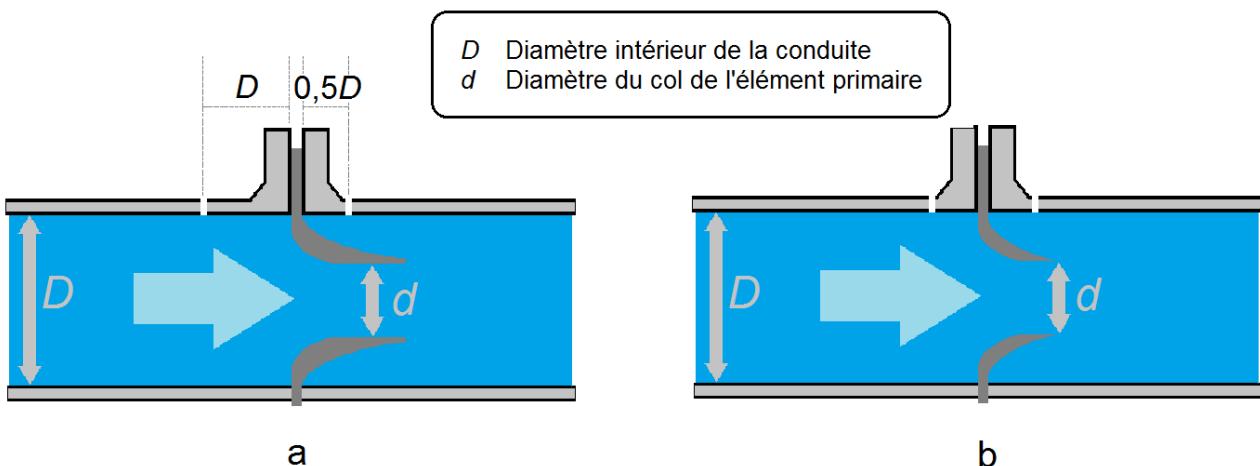


Figure 55 : Tuyère à long rayon (a) et tuyère ISA (b)

Cône de mesure (Figure 56) :

- Tube d'écoulement à bride;
 - Cône (son nez peut être plat, pointu, incurvé ou en forme de coude) dont le diamètre (dc) se mesure à la section A;

- Structure de support servant à maintenir le cône concentriquement au centre de la conduite;
- Prises pour la mesure de pression amont et aval.

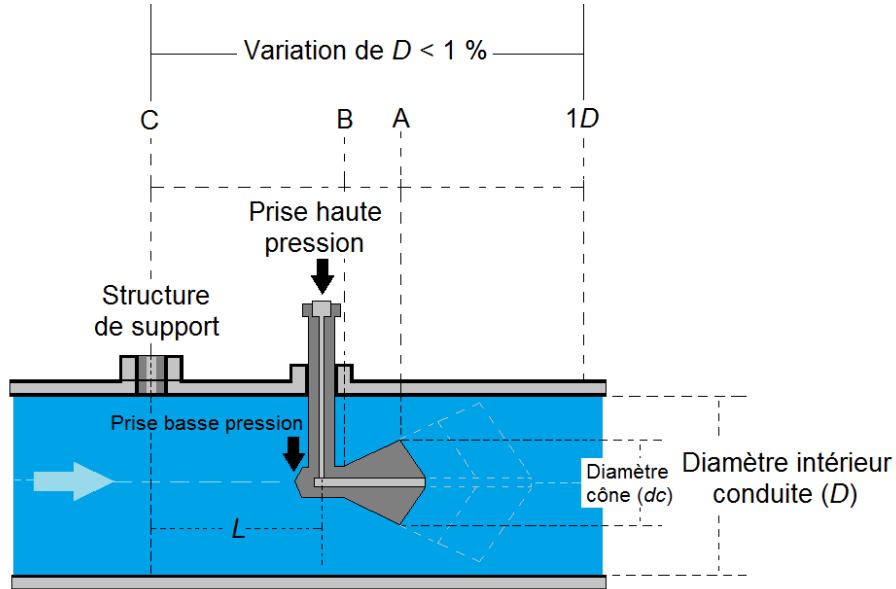


Figure 56 : Cône de mesure

4.4.1.2 Description et fonctionnement des débitmètres à insertion

Les débitmètres à insertion basés sur le principe de mesure de la pression différentielle sont de deux types, soit le tube de Pitot et la sonde Annubar (ou sonde de Burton). Le tube de Pitot (Figure 57) est constitué d'une sonde de forme tubulaire insérée directement dans la conduite. Il permet l'obtention du débit par la mesure directe de la pression dynamique.

Un tube à basse pression (ou tube extérieur) est en contact perpendiculairement à l'écoulement du fluide. Il peut s'agir d'un point de mesure orienté vers l'aval de l'écoulement ou encore d'un tube dont le bout n'est pas en contact direct par rapport au sens de l'écoulement. La pression dans cette partie correspond donc à la pression statique en un point de la section.

Le tube à haute pression (ou tube intérieur) est parallèle à l'écoulement du fluide et est directement en contact avec ce dernier à contre-courant. Ce tube est inséré de façon à freiner l'écoulement. La pression mesurée à ce point correspond donc à la pression totale, soit la somme de la pression statique et de la pression dynamique.

Un manomètre mesure la différence entre ces deux pressions (pression différentielle), ce qui permet d'obtenir la pression dynamique de l'écoulement et, indirectement, une indication locale de la vitesse d'écoulement. La pression de sortie du débitmètre peut aussi être reliée à un transmetteur de pression différentielle qui fournira un signal électrique proportionnel à la vitesse d'écoulement mesurée sur la ligne de mesure (Figure 57).

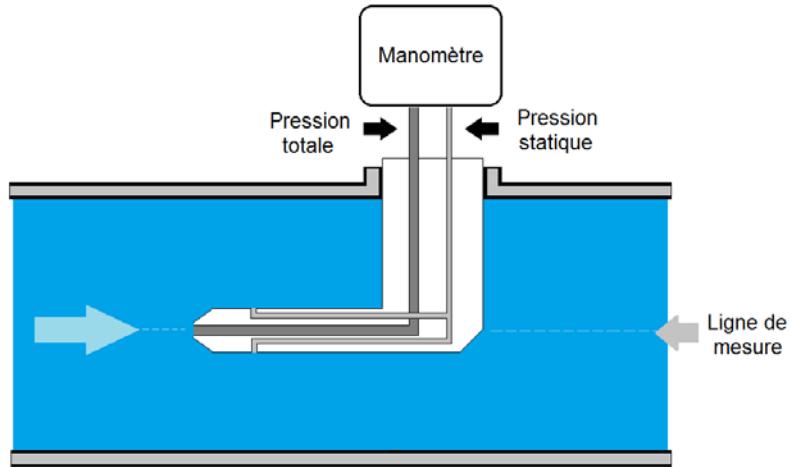


Figure 57 : Tube de Pitot – Mesure sur une ligne de mesure

Pour certains modèles, la vitesse est mesurée à un seul point du profil d'écoulement de la conduite, c'est-à-dire sur une ligne de mesure (Figure 57). Le débit dans la canalisation est donc calculé sur la base d'une mesure de vitesse ponctuelle dans l'écoulement qui est ensuite multipliée par l'aire de la section transversale. En considérant cette vitesse uniforme sur toute la section de la canalisation, on peut ainsi établir le débit (Q_v). L'appareil doit donc être utilisé dans des conduites où la vitesse est bien répartie. De plus, des étalonnages sont nécessaires à différents niveaux de débit, car le profil de vitesse peut changer en fonction du débit et parce que les mesures ne sont qu'un échantillonnage des vitesses locales dans la conduite.

D'autres modèles de tubes de Pitot (Figure 58) ainsi que la sonde Annubar (ou sonde de Burton) se basent sur ce même principe de fonctionnement, à la différence que la mesure à haute pression résulte de la moyenne des vitesses dans le tuyau effectuée à partir de plus d'une prise de pression. Ces appareils sont donc plus précis, car ils ne dépendent ni de la position ni du profil de vitesse de l'écoulement.

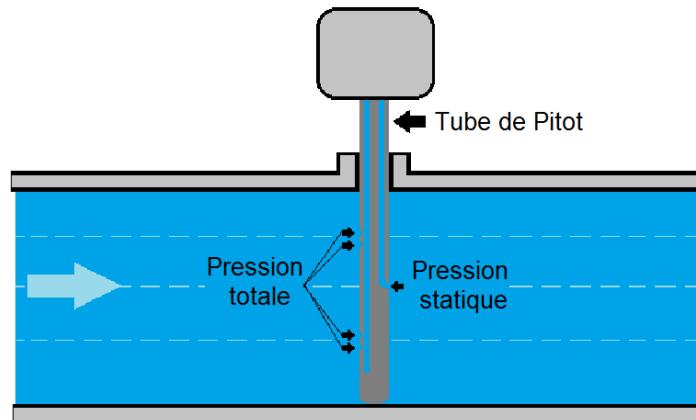


Figure 58 : Tube de Pitot – Mesure à partir de plusieurs prises de pression

4.4.1.3 Applications

Les débitmètres à organe déprimogène et les débitmètres à insertion sont adaptés aux liquides monophasiques, homogènes physiquement et thermiquement.

Le diaphragme et le tube de Pitot ne sont pas recommandés en présence de liquide comportant des matières en suspension, étant donné le risque d'accumulation. La tuyère et le cône de mesure peuvent être utilisés dans ces circonstances, mais leur utilisation en présence de matières en suspension est plus restrictive que pour le tube de Venturi.

Ces appareils sont adaptés à une grande variété de diamètres de conduite en fonction des modèles et des fabricants. Le Tableau 26 présente un ordre de grandeur des diamètres offerts pour les différents débitmètres.

Tableau 26 : Comparaison des diamètres de conduite pour différents débitmètres (en mm)

Tube de Venturi	Diaphragme	Tuyère	Cône de mesure	Tube de Pitot
25 à 3 000	10 à 1 000	25 à 630	15 à 1 800	50 à 1 800

4.4.1.4 Conditions d'installation

La présente section a pour but de présenter certaines conditions d'installation générales. Des particularités d'installation sont applicables pour chacun de ces types d'équipements, et les recommandations du fabricant doivent être respectées.

De plus, les normes ISO 5167-1 à 5167-5 décrivent en détail les éléments applicables pour le tube de Venturi, le diaphragme, la tuyère et le cône de mesure, alors que la norme ISO 3966 décrit les éléments qui concernent le tube de Pitot.

Les points suivants doivent être respectés lors de l'installation de ces équipements :

- L'utilisation sur une conduite complètement remplie dans la section de mesurage;
- La position de l'appareil sur la conduite. Une position horizontale est généralement recommandée. Cette position peut toutefois favoriser l'accumulation de matières en suspension (ex. : en amont d'un diaphragme). Dans ce cas, il est nécessaire de vérifier si une position verticale est acceptable ou si un autre type d'équipement de mesure doit être choisi.

La position verticale est parfois acceptable, mais un écoulement ascendant est alors requis pour maintenir la conduite pleine et sous pression;

- Les longueurs droites de conduite cylindrique présentant un diamètre constant et des longueurs minimales spécifiées constantes. Ces longueurs sont fonction du diamètre (D) de la conduite. Elles peuvent s'étendre entre 3 et 60D en amont et entre 3 et 5D en aval de l'élément de mesure.

L'utilisation d'un conditionneur d'écoulement peut dans certains cas permettre d'utiliser des longueurs amont plus courtes.

Les longueurs minimales sont variables selon le type d'appareil, la marque et le modèle, mais aussi en fonction du type de perturbation, par exemple un coude ou deux coude, un évasement de la conduite, une pompe, un clapet, un filtre, etc.;

- Le nombre de prises de pression et leur emplacement, dans le respect des distances amont et aval. Ce critère est aussi fonction du diamètre (D) de la conduite, par exemple 1D amont et 0,5D aval;
- Les caractéristiques de l'appareil (ex. : épaisseur de la plaque à orifice);
- Les caractéristiques de la conduite (ex. : épaisseur, matériaux, etc.);
- L'intérieur de la conduite doit être propre en tout temps. Tout défaut métallique de la conduite, tel que le métal écaillé, doit être éliminé;
- L'élément primaire doit être installé dans la conduite dans une position telle que les conditions d'écoulement immédiatement en amont de l'appareil se rapprochent de celles d'un écoulement complètement établi et exempt de giration.

4.4.2 Induction magnétique

Cette section porte sur les débitmètres dont le principe de mesure est basé sur l'induction magnétique et inclut les débitmètres électromagnétiques à insertion et non intrusif.

Description et fonctionnement des débitmètres électromagnétiques (non intrusif et à insertion)

Un débitmètre électromagnétique de type non intrusif (« manchette ») est un appareil créant un champ magnétique perpendiculaire à l'écoulement. Ce champ magnétique est créé à partir d'un ensemble de bobines magnétiques alimenté électriquement et placé de part et d'autre de la conduite ainsi que de deux électrodes percées transversalement à la conduite. Ces électrodes affleurent la surface interne de la conduite de façon à ce qu'elles soient en contact avec le liquide, sans interférer avec l'écoulement et sans provoquer de perte de charge.

La Figure 59 présente une illustration du fonctionnement d'un débitmètre électromagnétique non intrusif (installé à l'extérieur de la conduite).

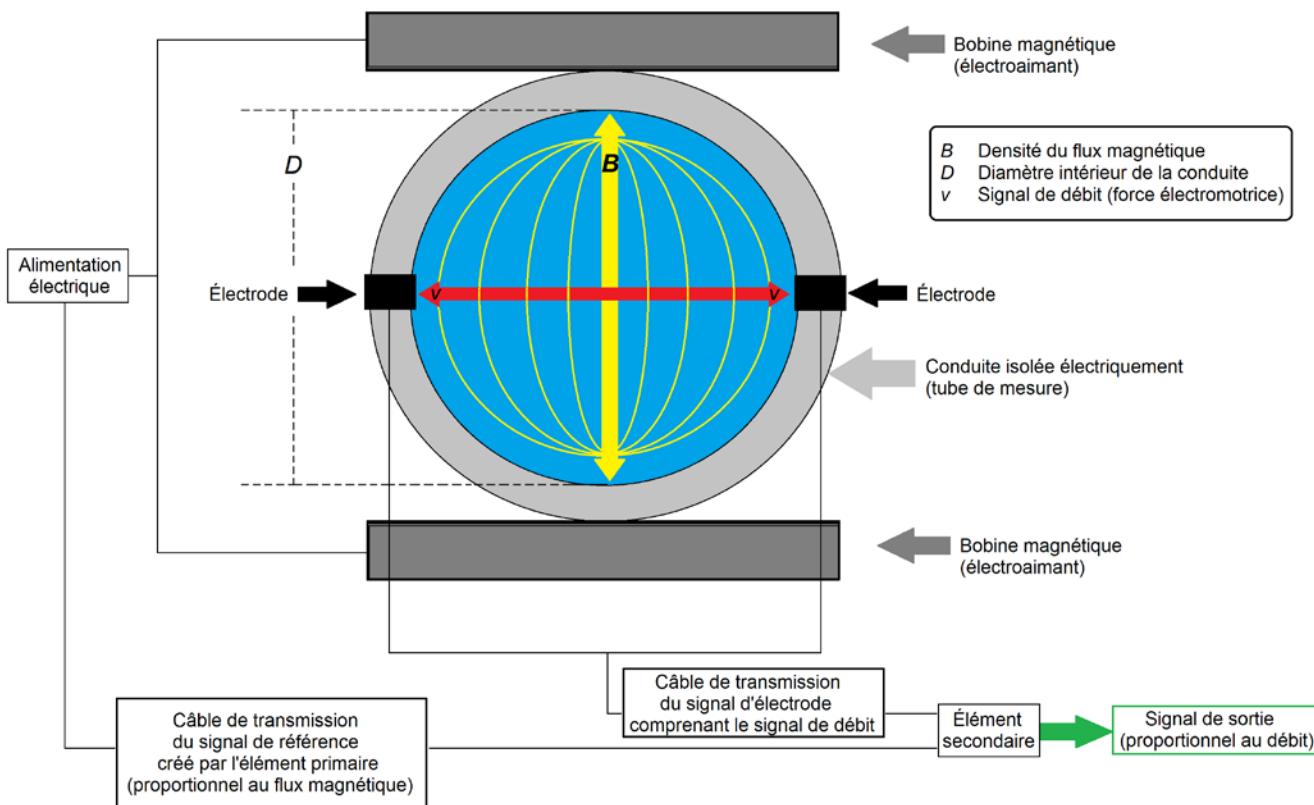


Figure 59 : Coupe transversale et fonctionnement d'un débitmètre électromagnétique non intrusif

Le débitmètre électromagnétique est aussi offert sous la forme d'un débitmètre à insertion, dont le calcul de la vitesse moyenne peut s'effectuer de façon mono-point ou multi-point. Dans le premier cas, le débitmètre mesure v_{\max} qui est ensuite corrigée pour obtenir v_{moy} . Dans l'autre cas, l'appareil mesure en plusieurs points du diamètre de la conduite la vitesse pour ensuite recalculer une vitesse moyenne.

Il peut donc s'agir d'une sonde insérée au centre ou, pour de très grands diamètres, à 1/8 du diamètre de la conduite, ce qui permet une mesure à point unique (mono-point) (Figure 60). Le champ magnétique est donc uniquement confiné à l'extrémité de la sonde. L'installation au centre est à privilégier.

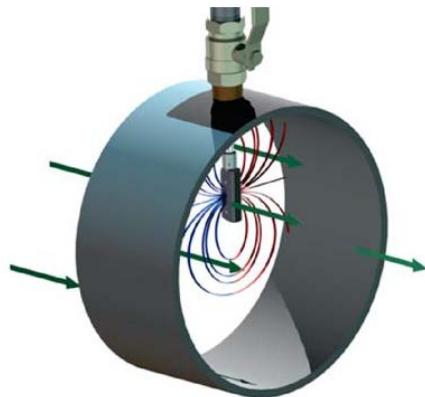


Figure 60 : Débitmètre électromagnétique à insertion (AVI 5.0)

Fournie par : Greyline Instruments inc.

Plusieurs électrodes peuvent aussi être placées sur le corps du capteur (multi-point), ce qui permet d'obtenir le débit moyen sur tout le diamètre de la conduite (Figure 61). Ce type d'équipement offre donc la possibilité de compenser les profils d'écoulement inégaux causés, par exemple, par des longueurs d'approche insuffisantes (ex. : coude) ou des conditions d'écoulement tourbillonnaires. Ce type d'équipement est principalement privilégié pour des applications de liquide propre puisque le capteur peut faire obstruction aux matières en suspension et aux débris.

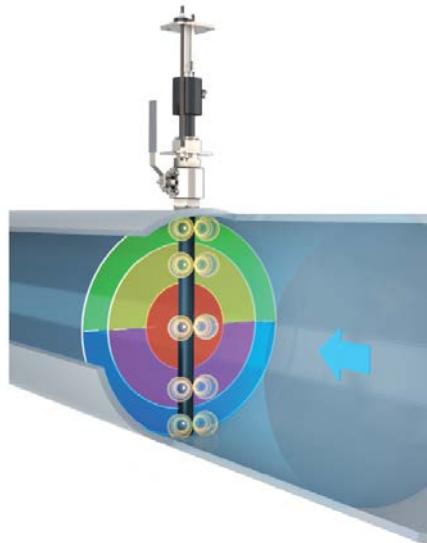


Figure 61 : Débitmètre électromagnétique à insertion (TORPEE-MAG)

Fournie par : Flow-Tronic, Belgique

Le débitmètre électromagnétique comprend un élément primaire et un ou plusieurs éléments secondaires. Les éléments primaire et secondaire peuvent être combinés en un seul ensemble, mais il peut être difficile de distinguer visuellement les différents éléments constitutifs de l'appareil.

L'élément primaire produit un signal proportionnel au débit et, dans certains cas, il produit aussi le signal de référence. Il s'agit d'un ensemble comprenant :

- Une conduite fermée (tube de mesure) isolée électriquement (et constituée ou recouverte d'un matériau non magnétique) à travers laquelle s'écoule le liquide conducteur à mesurer;
- Une ou plusieurs paires d'électrodes de mesure diamétralement opposées, servant à mesurer le signal engendré dans le liquide;
- Des bobines magnétiques (électroaimants) qui, une fois alimentées électriquement (par un courant alternatif ou continu), créent un champ magnétique dans la conduite (illustré par les lignes jaunes sur la Figure 59). Les bobines peuvent être montées à l'extérieur de la conduite ou intégrées à la tuyauterie (débitmètre non intrusif) ou le long de la tige du débitmètre (débitmètre à insertion).

Pour sa part, l'élément secondaire est composé de l'ensemble des éléments qui extraient le signal de débit à partir du signal des électrodes, l'amplifient et le convertissent en un signal de sortie normalisé, proportionnel au débit.

La présente section s'appuie sur la norme ISO 6817 et porte sur les débitmètres électromagnétiques mesurant le débit d'un liquide conducteur dans une conduite fermée remplie et utilisant un courant alternatif ou un courant continu pulsé.

4.4.2.1 Applications

Les débitmètres électromagnétiques offrent la possibilité d'un calcul des vitesses bidirectionnelles. L'intervalle de vitesse *in situ* varie en fonction du diamètre de la conduite et doit correspondre à l'intervalle de vitesse de l'appareil, qui peut varier en fonction du type d'appareil (insertion ou non) (ex. : de 0,2 à 10 m/s). Il est conseillé de choisir le diamètre de la conduite de manière à ce que la vitesse du liquide au débit minimal soit la plus grande possible pour une meilleure garantie de précision et une stabilité du zéro; les exigences sur ce point peuvent cependant varier selon les fabricants.

Le liquide doit aussi présenter une conductivité supérieure à la conductivité minimale de l'appareil sélectionné (ex. : 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$), et la conductivité doit être uniforme dans l'écoulement.

Les diamètres disponibles sont variables selon les marques et les modèles de débitmètres (ex. : de 25 à 3 000 mm). La diversité des options d'installation (ex. : diamètre de conduite, options d'électrodes, montage sans obstruction, à insertion, etc.) permet une adaptation à différents types de procédés, allant des liquides propres aux boues, mais excluant toutefois les hydrocarbures ou l'eau distillée. Ils sont efficaces à la fois pour les très petits et les très grands débits volumiques.

4.4.2.2 Conditions d'installation

Les débitmètres électromagnétiques vendus sur le marché offrent une bonne exactitude de mesure. Toutefois, pour que la performance théorique de l'appareil soit conservée, les éléments suivants doivent être pris en considération lors de son installation :

- Il faut éviter la proximité d'une installation électrique qui peut interférer avec le signal du débit;
- Il est important d'aligner minutieusement l'axe de l'élément primaire avec celui de la tuyauterie;
- Le diamètre intérieur de la conduite amont/aval peut généralement être le même que celui du tube de mesure. Par contre, si la vitesse moyenne au débit maximal est inférieure à la valeur recommandée par le fabricant, il est conseillé d'utiliser un élément primaire de plus petit diamètre. Si le diamètre du débitmètre est sous-dimensionné par rapport à celui de la conduite, il doit être raccordé à cette dernière par des pièces coaxiales de forme conique;
- Il n'y a pas de restriction théorique quant à la position verticale ou horizontale de l'élément primaire, tant que la conduite reste pleine en tout temps; selon les conditions d'écoulement, le choix de la position peut cependant devenir un élément important à considérer. En cas de doute quant au remplissage complet de la conduite, il est possible de faire une installation en angle (ex. : 45°);
- On privilégiera un montage vertical si l'écoulement comporte des matières abrasives afin d'assurer une usure uniforme de l'intérieur de la conduite;
Un montage vertical est aussi recommandé dans le cas où des matières en suspension peuvent se déposer, sinon il est requis de prévoir un système de purge;
- Le débitmètre électromagnétique à insertion est aussi sensible aux bulles d'air au niveau des électrodes; il est important de bien choisir un emplacement adéquat;
- Dans la mesure du possible, il faut procéder à une installation dans une section présentant un profil d'écoulement turbulent pleinement développé. Selon les conditions de chaque installation et les variations de débit sur le réseau, le profil d'écoulement peut cependant varier sensiblement et devenir laminaire à faible vitesse; il est important de considérer l'incidence de ces variations de profil sur la précision de mesure du débitmètre;
- Il est important d'appliquer les recommandations du fabricant à propos des distances amont et aval libres de perturbations. En l'absence de recommandations du fabricant, on doit respecter les distances amont de 10 DN et aval de 5 DN correspondant au diamètre nominal (DN) de la conduite. En effet, selon ISO 6817, une distance de 10 DN libre d'obstruction en amont des électrodes est requise pour que les performances de l'appareil ne soient pas modifiées de plus de 1 %;
- Un écoulement giratoire peut influencer le signal et faire varier le facteur d'étalonnage. Il peut être difficile de prévoir l'importance et la répartition d'un écoulement giratoire, et il peut être requis d'ajouter un dispositif antigiration en amont de l'élément primaire;
- L'installation doit prendre en compte l'accès ultérieur à l'appareil pour qu'on puisse procéder à l'entretien, à la vérification de l'exactitude, à la vérification du zéro ou à

l'étalonnage, si requis. Par exemple, il peut-être souhaitable dans certains cas de prévoir une conduite de contournement permettant de procéder à l'entretien ou à l'installation d'un appareil de vérification, ou encore de prévoir des moyens d'arrêt du débit dans l'élément primaire pour la vérification du zéro.

L'installation de l'élément secondaire doit aussi respecter les spécifications du fabricant. De façon générale, les éléments suivants sont à considérer dans le choix de l'emplacement sélectionné pour son installation :

- S'assurer d'avoir un endroit accessible;
- Éviter les vibrations excessives;
- Respecter les spécifications du fabricant relativement à la température ambiante et à l'humidité;
- Éviter l'exposition directe au soleil;
- S'assurer que les câbles transportant les signaux d'électrodes et les signaux de référence sont d'un type approuvé par le fabricant et qu'ils sont aussi courts que possible en veillant à ne pas dépasser les limites imposées par le fabricant;
- Éviter l'installation des câbles de transport des signaux à proximité de câbles à haute intensité;
- S'assurer que les éléments suivants sont inscrits sur l'appareil ou sur une plaque signalétique : le type d'appareil, le numéro de série, l'alimentation électrique (tension, fréquence et puissance), les signaux de sortie et l'impédance de charge limite.

4.4.3 Ultrasons

Cette catégorie regroupe les équipements basés sur les principes du temps de parcours (ou temps de transit) et de l'effet Doppler.

4.4.3.1 Description et fonctionnement des débitmètres à temps de parcours (externe et à insertion)

Le principe du temps de parcours est basé sur la vitesse de transmission d'une onde dans l'eau en mouvement. Les capteurs (ou sonde) peuvent être montés à l'extérieur de la conduite (« *clamp-on* ») (Figure 62) ou de façon intrusive (à insertion) (Figure 63).

Le système de mesure ultrasonique à insertion offre généralement une plus grande exactitude que le système *clamp-on*, mais l'installation s'avère plus complexe. Cette option peut être nécessaire lorsque la conduite n'est pas perméable aux ultrasons. Le même principe de mesure s'applique pour les systèmes à insertion ou externe.

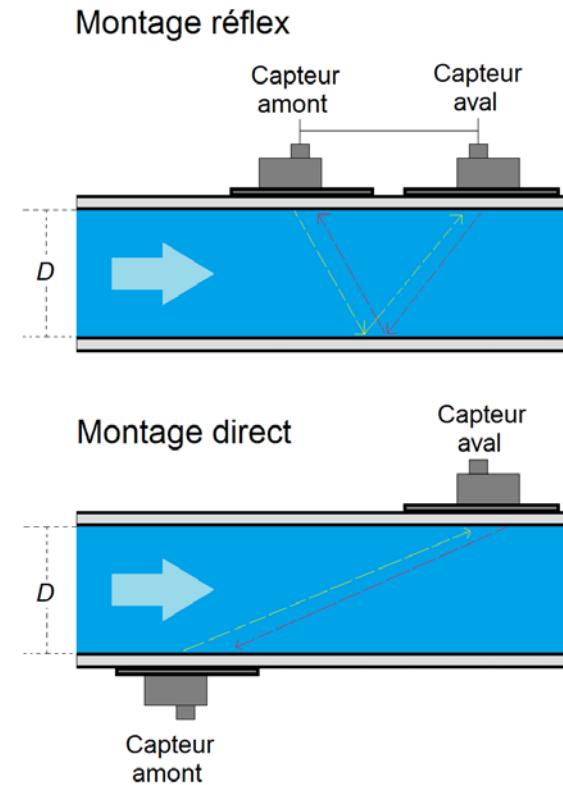


Figure 62 : Types d'installations d'un débitmètre ultrasonique externe à temps de parcours (clamp-on)

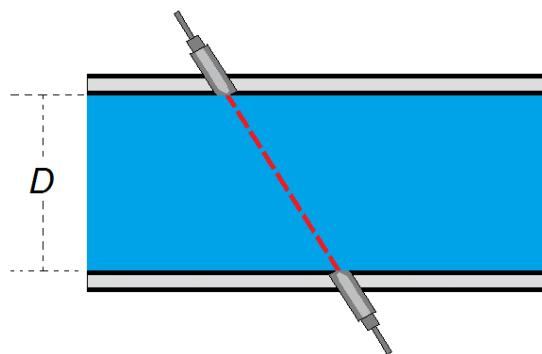


Figure 63 : Débitmètre ultrasonique à insertion

Le signal sonore (ou l'impulsion ou la pulsation) est émis diagonalement par rapport à l'axe de la conduite par le capteur amont et le capteur aval. Les capteurs agissent en alternance en tant qu'émetteur et récepteur du signal.

En l'absence d'écoulement, le temps de parcours serait égal dans les deux directions. Cependant, à mesure que la vitesse d'écoulement s'accroît, la vitesse du signal sonore envoyé dans la direction de l'écoulement augmente, alors que la vitesse de celui envoyé dans le sens opposé diminue (Figure 64).

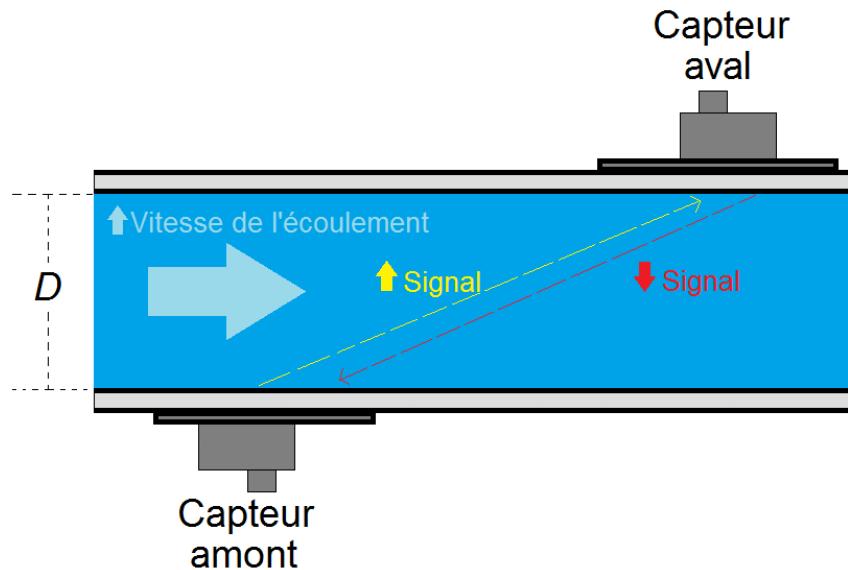


Figure 64 : Modification du signal selon la variation de la vitesse d’écoulement

La différence de temps de parcours entre l’onde acoustique dirigée vers l’aval et celle dirigée vers l’amont est directement proportionnelle à la vitesse du liquide dans la conduite, et permet donc d’établir la vitesse moyenne qui servira ensuite à calculer le débit.

Comme l’illustre la Figure 62, le montage des capteurs peut se faire de façon réflexe (aussi nommé montage en V) (les capteurs sont installés côte à côte sur la conduite et le signal est retourné par la conduite) ou directe (ou montage en Z) (les capteurs sont installés de chaque côté de la conduite). Un autre mode de montage, celui en « W », est aussi possible bien que plus rare et réservé aux petites conduites.

4.4.3.2 Description et fonctionnement des débitmètres à effet Doppler (externe et à insertion)

L’effet Doppler se base sur la variation de la fréquence de l’onde réfléchie. Les dispositifs utilisent généralement deux éléments en céramiques fonctionnant alternativement en émission et en réception.

L’émetteur envoie une onde ou une vibration dans l’écoulement où sont présentes des particules ou des bulles d’air en suspension (Figure 65). Ces dernières agissent en tant que réflecteurs et retournent les ultrasons vers le récepteur qui les enregistre. Ainsi, si les réflecteurs sont en mouvement, les ondes sonores réfléchies subissent une différence ou un décalage en fréquence (effet ou fréquence Doppler) par rapport à la fréquence émise. La différence entre ces deux fréquences est directement proportionnelle à la vitesse des réflecteurs, et donc à la vitesse de l’écoulement, à partir de laquelle le débit peut être obtenu.

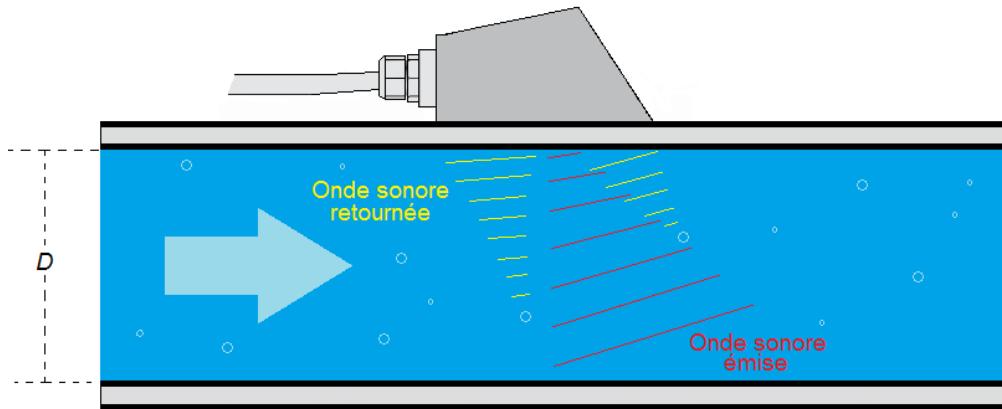


Figure 65 : Illustration du fonctionnement d'un débitmètre ultrasonique à effet Doppler

4.4.3.3 Applications

L'utilisation du débitmètre ultrasonique à temps de parcours s'applique aux liquides monophasiques conducteurs acoustiquement, c'est-à-dire qui sont en mesure de transmettre les ultrasons. C'est le cas de la plupart des liquides propres et des liquides comportant de petites quantités de matières en suspension ou de bulles de gaz.

L'utilisation de ce débitmètre n'est pas restreinte par la conductivité de l'eau. Il est toutefois sensible à la qualité de l'eau, et le fluide ne doit pas contenir une concentration importante de bulles ou de solides. Dans le cas contraire, le son à haute fréquence sera atténué et ne pourra pas traverser la conduite.

Le principe de mesure du débitmètre à effet Doppler nécessite quant à lui la présence de gaz ou de matières en suspension dans l'écoulement pour fonctionner correctement.

Les équipements disponibles offrent des possibilités d'installation sur des conduites de diamètres très diversifiés en fonction du type de débitmètre (externe ou à insertion) et des modèles, soit de 10 à 9 000 mm pour les débitmètres à temps de parcours et de 10 à 1 000 mm pour les Doppler. Il en est de même pour les vitesses d'écoulement recommandées, qui peuvent s'étendre de 0,1 à 25 m/s pour les débitmètres à temps de parcours et de 0,05 à 12 m/s pour les Doppler.

4.4.3.4 Conditions d'installation

Les recommandations du fabricant doivent être respectées lors de l'installation de l'équipement. De façon générale, les éléments suivants doivent être considérés en fonction du type d'équipement :

Temps de parcours :

- La conduite doit être faite d'un matériau propice à la propagation des ultrasons, et les matériaux poreux comme le béton et la fonte sont à éviter;

- La conduite doit être pleine en tout temps;
- La section de mesurage ne doit pas être située à proximité de perturbations hydrauliques (ex. : coudes, clapets, vannes, aval immédiat de pompes, etc.);
- L'installation sur des conduites de refoulement présentant beaucoup de bulles d'air ou de gaz susceptibles de perturber la propagation des ondes ultrasonores est à éviter;
- Le débitmètre peut être installé en position verticale ou horizontale, toutefois cette dernière option présente un risque accru d'accumulation de sédiments;
- Des précautions doivent être prises pour que soit garantie une parfaite orientation des capteurs en émission et en réception;
- Ce type d'équipement est sensible aux changements du profil de la vitesse, et l'exactitude de la mesure de la vitesse est compromise par toute distorsion du profil de vitesse. Il doit donc être installé à un emplacement où le profil d'écoulement est entièrement développé;
- Il faut prévoir une section droite libre de perturbations pouvant s'étendre de 5 à 20 DN en amont et de 3 à 5 DN en aval, en respect des recommandations du fabricant et du type de perturbation (ex. : pompe).

Ce type de débitmètre indique un débit même lorsque les conditions sont très mauvaises, et il n'y a que la présence d'air dans la conduite qui implique un décrochage évident des données. En plus des conditions d'installation, les informations de qualité et la force du signal doivent toujours être suivies afin que les données soient bien interprétées.

Doppler :

- Le matériau de la conduite sur laquelle le capteur est fixé doit permettre la transmission des ultrasons. Dans le cas contraire, le capteur peut être inséré dans la conduite;
- La conduite doit être pleine en tout temps;
- La section de mesurage ne doit pas être placée à proximité de perturbations hydrauliques (ex. : coudes, clapets, vannes, aval immédiat de pompes, etc.);
- Le capteur doit être installé dans l'axe de l'écoulement;
- L'axe moyen d'écoulement dans la section de mesurage doit toujours demeurer parallèle aux parois de la conduite;
- Le débitmètre peut être installé en position verticale ou horizontale, toutefois cette dernière option présente un risque accru d'accumulation de sédiments;
- Pour une installation externe, le capteur est fixé à plat sur la paroi extérieure de la conduite;
- Il faut prévoir une section droite libre de perturbations pouvant s'étendre de 10 à 15 DN à l'amont et de 5 DN à l'aval, en respect des recommandations du fabricant et du type de perturbation (ex. : pompe).

4.4.4 Énergie mécanique

Ces appareils sont parfois considérés comme des indicateurs de débits plutôt que comme des débitmètres. Ils sont tout de même présentés ici à titre informatif.

4.4.4.1 Description et fonctionnement du débitmètre à roue à aubes (« paddlewheel » ou débitmètre à roue à palette)

Le débitmètre à roue à aubes ou à roue à palette (Figure 66) doit tout d'abord être distingué du débitmètre à palette (Figure 67). Dans ce dernier cas, la palette est soumise à la force exercée par l'écoulement du fluide, à sa masse et éventuellement à l'action d'un ressort de rappel. La position d'équilibre de la palette est fonction du débit et peut être convertie en signal électrique à l'aide d'un potentiomètre dont l'axe est fixé à celui de la palette. Le débitmètre à palette ne sera pas détaillé dans le présent document.

Le débitmètre à roue à aubes est un débitmètre à insertion utilisant l'énergie mécanique du liquide en écoulement pour faire tourner une roue à aubes. Le mouvement de la roue est proportionnel à la vitesse de l'écoulement. La rotation peut être détectée mécaniquement ou en fonction d'une impulsion magnétique. L'émetteur traite par la suite le signal d'impulsion afin de déterminer le débit de l'écoulement.

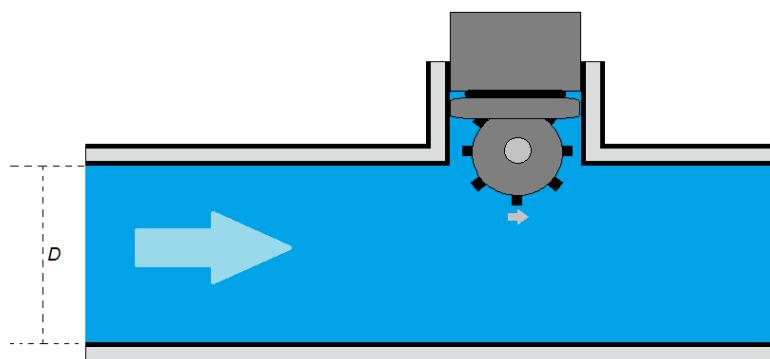


Figure 66 : Débitmètre à roue à aubes

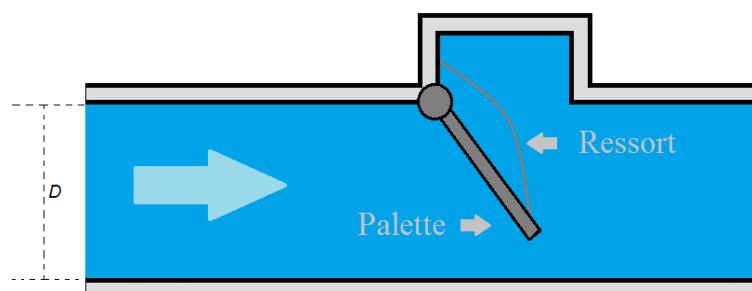


Figure 67 : Débitmètre à palette

4.4.4.2 Description et fonctionnement du débitmètre à vortex

Le débitmètre à vortex (ou à effet vortex) est un débitmètre à insertion permettant de mesurer le débit volumique de l'écoulement.

Une série de vortex (tourbillons) est induite en aval d'un obstacle non profilé (barre à vortex) fixé dans l'écoulement (Figure 68). Le principe de mesure est basé sur l'observation de ce détachement de vortex après l'obstacle. Ce phénomène est semblable à celui observé par exemple dans une rivière dont l'écoulement est perturbé par le pilier d'un pont.

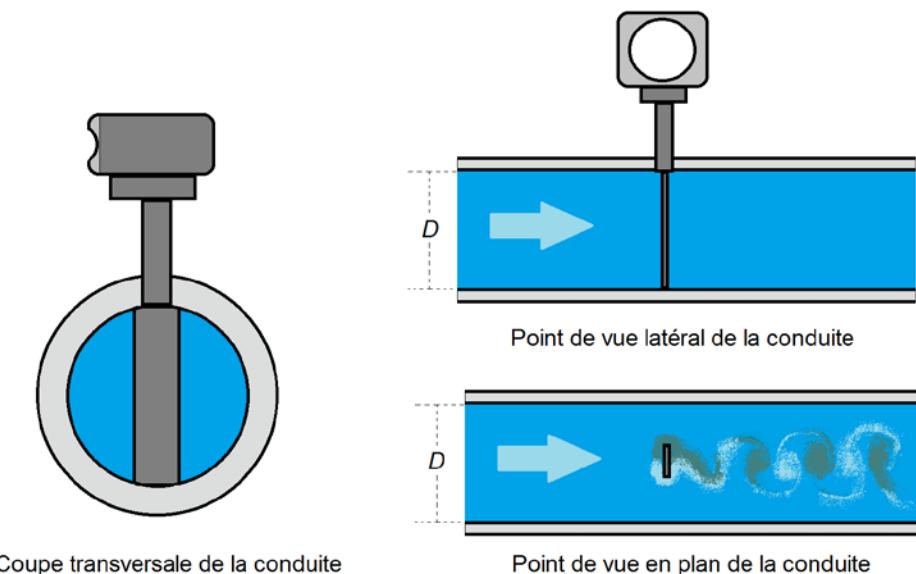


Figure 68 : Débitmètre à vortex

Lorsqu'un tourbillon se détache, un écoulement dissymétrique se forme, ce qui modifie la distribution des pressions qui sont détectées et mesurées par un capteur. La fréquence de ces vortex est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement. Le traitement numérique de l'appareil compte les vortex et convertit cette valeur en vitesse par un signal de sortie de 4 à 20 mA.

4.4.4.3 Description et fonctionnement du débitmètre à turbine

Le débitmètre à turbine se compose de trois éléments principaux :

- Le capteur constitué par la turbine (moulinet ou rotor à pales), installé dans la conduite et positionné le long de l'axe central;
- Un transducteur (appelé aussi sortie ou émetteur) transformant la rotation de la turbine en un signal électrique exploitable par l'indicateur;
- Un indicateur de débit ou de volume.

L'énergie mécanique de l'écoulement du liquide entraîne la rotation de la turbine, dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement, donc au débit (Figure 69).

À mesure que le liquide s'écoule à travers le débitmètre, il entre en contact avec les pales de la turbine qui tournent autour de l'axe central. La vitesse angulaire (de rotation) du rotor de la turbine est directement proportionnelle à la vitesse du liquide traversant la turbine. La sortie résultante est mesurée par un détecteur électrique monté sur le corps du débitmètre et convertie en un signal proportionnel au débit instantané.

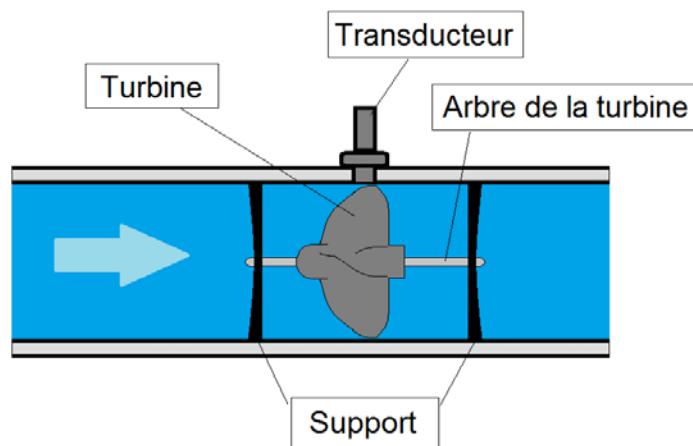


Figure 69 : Débitmètre à turbine

Étant donné son principe de fonctionnement, cet appareil est mieux adapté aux vitesses modérées à débit constant. En effet, il offre une moins grande exactitude à faible débit en raison du ralentissement ou de l'inertie du rotor et il n'est pas recommandé pour de grandes vitesses ou de grands débits, qui risquent d'engendrer une usure prématuée des roulements (utilisation < 5 % du débit maximal).

4.4.4.4 Description et fonctionnement du rotamètre (ou débitmètre à flotteur ou débitmètre à section variable)

Un rotamètre est constitué d'un petit flotteur placé dans une conduite verticale conique (Figure 70). L'élément de mesure est composé d'un tube à section variable usiné et d'un flotteur. La longueur du tube de mesure se situe entre 110 et 350 mm.

Le liquide entre par la partie inférieure du tube de mesure et y circule dans le sens ascendant. Lorsque le débit augmente, le liquide génère plus de force et soulève le flotteur jusqu'à ce que toutes les forces en présence (la friction, l'apesanteur et la flottabilité du flotteur) soient en équilibre. La stabilisation du flotteur indique donc que la force de soulèvement créée par le débit s'équilibre avec la masse du flotteur. Le débit étant proportionnel au déplacement du flotteur, chaque position du flotteur correspond à un débit donné, au moyen des échelles gravées directement sur le tube de mesure.

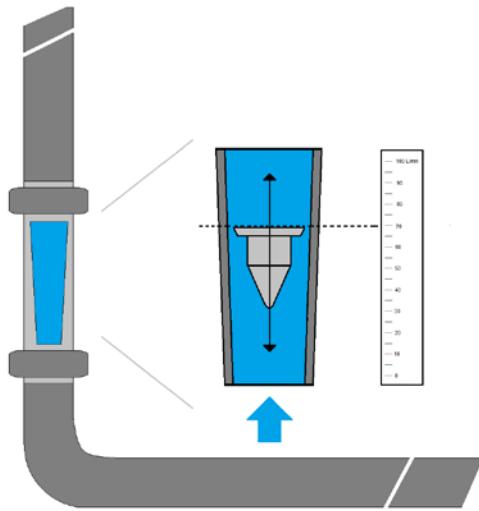


Figure 70 : Rotamètre

4.4.4.5 Description et fonctionnement du débitmètre à déplacement positif (ou débitmètre à engrenage)

Contrairement aux appareils qui mesurent une autre grandeur (ex. : vitesse), le débitmètre à déplacement positif mesure directement le volume du liquide traversant le débitmètre.

Le débitmètre emprisonne de façon répétée le liquide, pour que le nombre de remplissages du godet corresponde au débit. Le piégeage du liquide est généralement effectué avec des pièces rotatives qui forment des joints mobiles entre eux (Figure 71). De nombreuses géométries de débitmètre à déplacement positif sont offertes.

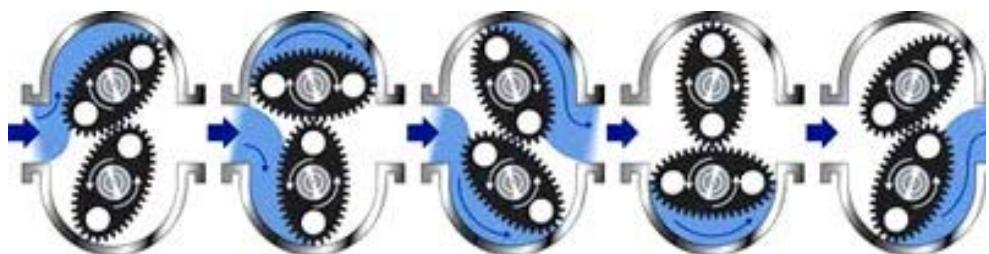


Figure 71 : Fonctionnement du débitmètre à déplacement positif

Source : Macnaught USA inc.

La rotation est détectée mécaniquement, et l'émetteur traite le signal généré par la rotation pour déterminer le débit du fluide. L'augmentation de la circulation du liquide implique que les pièces rotatives tournent proportionnellement plus vite.

Les pièces en rotation sont conçues pour que les joints puissent empêcher le liquide de traverser le débitmètre sans être mesuré (glissement).

4.4.4.6 Description et fonctionnement du Coriolis (ou débitmètre massique à effet Coriolis)

Les débitmètres massiques se répartissent en deux technologies, soit les débitmètres thermiques et Coriolis. Les débitmètres thermiques ne seront pas présentés dans ce document puisque ces équipements sont principalement utilisés pour la mesure des gaz.

Un débitmètre massique est un appareil de mesure de débit basé sur la masse et non pas sur le volume. Il mesure donc la quantité de matière le traversant, plutôt que le volume, qui doit souvent être corrigé par la densité du liquide. De plus, les variations de température et de pression n'ont pas d'influence sur la masse. L'exactitude du débitmètre Coriolis est souvent considérée comme supérieure par rapport aux appareils se basant sur le débit volumique, qui demeurent pour leur part fiables tant que les conditions d'utilisation correspondent aux conditions d'étalonnage de référence.

L'appareil est composé d'un émetteur et d'un capteur qui forment une unité mécanique. Selon les fabricants, le capteur du débitmètre Coriolis peut se composer d'un tube simple ou double, de forme droite, coudée ou en U (Figure 72). Il mesure la force résultant de l'accélération causée par la masse du liquide qui se déplace vers un centre de rotation (ou s'en éloigne).

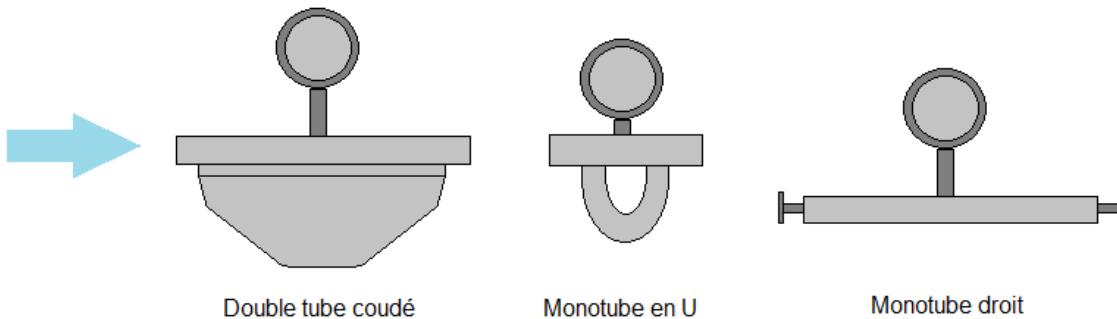


Figure 72 : Exemples de débitmètres Coriolis

L'amplitude de la force du débitmètre Coriolis dépend de la masse en mouvement et de sa vitesse d'oscillation dans le système. Une énergie est appliquée sur le tube par une vibration fixe. Lorsque le liquide passe à l'intérieur du (des) tube(s), l'impulsion du débit massique provoque une variation de la vibration du tube. Celle-ci fait osciller le tube, ce qui se traduit par un déphasage. Plus la quantité de matière traversant le tube est importante, plus ce déphasage est grand. Il est donc possible de déduire une sortie linéaire proportionnelle au débit à partir de la mesure de cette oscillation.

La Figure 73 illustre le déphasage de l'oscillation dans un capteur composé de deux tubes parallèles. À débit nul, les tubes oscillent en phase (Figure 73, 1). La différence de phase (mesurée aux points A et B) augmente avec l'augmentation du débit massique où une décélération de l'oscillation survient à l'entrée des tubes (Figure 73, 2) et une accélération à la sortie (Figure 73, 3). Des capteurs enregistrent les oscillations des tubes à l'entrée et à la sortie, et un transmetteur génère un signal de débit linéaire.

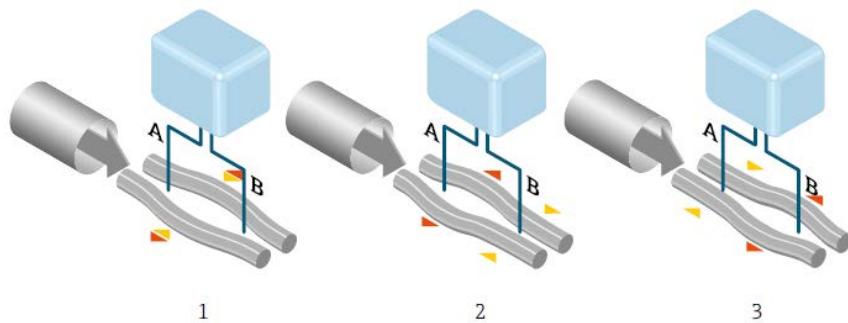


Figure 73 : Fonctionnement d'un capteur composé de deux tubes parallèles
Fournie par : Endress & Hauser (technical information – Proline Promass E300)

4.4.4.7 Applications

Le Tableau 27 résume les grandes lignes des applications pour chacun des débitmètres se basant sur un mode de fonctionnement mécanique.

Tableau 27 : Applications des débitmètres mécaniques

	Propriétés	Vitesse et débit	Conduite
Roue à aubes	<ul style="list-style-type: none"> Monophasique; Répartit uniformément dans la conduite (car la mesure s'effectue uniquement en bordure de la conduite); Liquide propre comportant peu de MES, ce qui permet d'éviter la dégradation des pièces mobiles; Liquide lubrifiant plutôt qu'abrasif, ce qui réduit le risque d'usure prématuée et la baisse d'exactitude. 	0,1 à 6 m/s; Utilisation < 5 % du débit maximal pour éviter l'usure prématuée des roulements	10 à 50 mm
Vortex	<ul style="list-style-type: none"> Monophasique; Non sensible à la qualité de l'eau, mais peut être sensible aux bulles d'air; Le liquide ne doit pas contenir de grandes fibres ou beaucoup de produits abrasifs. 	0,3 à 9 m/s; 0,002 à un peu plus de 1 m ³ /min	15 à 300 mm
Turbine	<ul style="list-style-type: none"> Plus approprié aux liquides propres et à faible viscosité; Les écoulements comportant des débris sont à éviter, étant donné le risque d'obstruction et de dommage du capteur. 	Vitesses modérées à débit constant (< 5 % du débit maximal)	< 600 mm
Rotamètre	<ul style="list-style-type: none"> Liquides relativement propres et suffisamment translucides, ce qui permet de voir le flotteur et que son fonctionnement ne soit pas obstrué; Permet une longueur de montage très compact. 	Idéal pour la mesure d'un petit débit (< 10 m ³ /h)	< 100 mm

		(ex. : débit de purge)	
	Propriétés	Vitesse et débit	Conduite
Déplacement positif	<ul style="list-style-type: none"> Liquides propres présentant une haute viscosité (ex. : huile); Il faut éviter les liquides abrasifs ou sales pouvant causer des dommages aux roulements ou le colmatage; Les liquides comportant des bulles de gaz sont à éviter, à moins que les bulles puissent être efficacement éliminées, car les volumes de bulles seront mesurés comme des volumes de liquide; Utile pour le contrôle des débits instantanés ou le dosage des volumes. 	Adapté au petit débit (ex. : 1 à 65 l/min)	S. O.
Coriolis	<ul style="list-style-type: none"> Principe de mesure indépendant des propriétés physiques du liquide et du profil d'écoulement; Sujet aux obstructions : pour des eaux usées, privilégier les appareils à tube droit plutôt qu'en U; N'entraîne aucune chute de pression; Plus volumineux que la moyenne des appareils; L'insensibilité relative à la densité permet des applications dans lesquelles les propriétés physiques du liquide ne sont pas bien connues. 	L'utilisation de l'appareil dans la partie supérieure de sa plage de débit est préférable, car un fonctionnement à faible débit peut dégrader l'exactitude de la mesure.	< 300 mm

4.4.4.8 Conditions d'installation

Pour tous ces appareils, les recommandations d'installation fournies par le fabricant doivent s'appliquer. La présente section résume quelques éléments à considérer.

Roue à aubes

- L'installation est rapide et facile sur la plupart des diamètres de conduites standard;
- Le montage est possible dans pratiquement n'importe quelle position.

Vortex

- L'installation se fait sur une conduite horizontale;
- L'arrêt de l'écoulement lors de l'installation n'est pas nécessaire;
- L'équipement doit être centré par rapport à la conduite pour qu'il n'y ait pas de vortex parasites;
- Toute irrégularité sur la surface interne de la conduite est à éviter;

- Il faut respecter une longueur droite amont entre 10 et 40 DN, selon le type de perturbation, et une longueur droite aval minimale de 5 D pour que les vortex se forment correctement.

Turbine

- L'installation se fait sur une conduite horizontale ou verticale, pleine en tout temps et ne comportant pas de bulles d'air;
- L'axe de l'arbre de l'hélice doit être installé à l'horizontale.

Rotamètre

- Comme l'effet d'apesanteur est uniquement effectif dans une orientation verticale, le tube de mesure doit être orienté verticalement. Des conceptions de flotteur à ressort opposé permettent d'installer ce type de débitmètre dans des conduites horizontales, car le fonctionnement du flotteur ne dépend pas dans ce cas de la gravité;
- Le fluide est ascendant;
- La partie mobile (flotteur) est maintenue rectiligne par deux guides à chaque extrémité du débitmètre;
- Les sections de la conduite en amont et en aval du débitmètre doivent idéalement avoir le même diamètre nominal que le corps du débitmètre;
- Une longueur libre de perturbations de 5 DN amont et de 2 DN aval est recommandée;
- Il faut éviter la présence de tout corps ferromagnétique à moins de 100 mm de l'indicateur;
- Avant l'installation du débitmètre, la conduite doit être nettoyée pour que tout corps étranger ou dépôt pouvant se fixer sur le flotteur aimanté ou sur les guides soit éliminé;
- Un filtre peut être installé en amont du tube de mesure pour retenir les grosses particules.

Déplacement positif

- La viscosité du liquide de fonctionnement doit être semblable à celle du liquide ayant servi à l'étalonnage, car les différents niveaux de glissement des liquides peuvent entraîner une erreur de mesure;
- L'installation d'un filtre peut être nécessaire pour enlever les dépôts présents dans l'écoulement et ainsi éviter l'usure des roulements;
- Le choix des matériaux de construction de toutes les pièces rotatives est important, et ils devraient être sélectionnés de façon à ce que la corrosion ou l'abrasion soient évitées. En effet, de petites quantités de corrosion ou d'abrasion peuvent endommager l'étanchéité et nuire à l'exactitude de la mesure.

Coriolis

- Des longueurs droites amont et aval ne sont pas nécessaires;
- Le débitmètre doit être complètement rempli de liquide.

- Les vibrations du tuyau sont à éviter, car ils peuvent causer des problèmes de fonctionnement.

Écoulement sous pression...



La mesure du débit sur une conduite sous pression se compose d'un élément primaire qui produit un signal proportionnel au débit extrait, mesuré et converti en un signal de sortie normalisé par l'élément secondaire. Visuellement, les éléments primaire et secondaire sont difficiles à distinguer.

Les systèmes de mesure du débit peuvent s'installer à l'extérieur de la conduite ou par insertion.

Une multitude d'équipements sont disponibles sur le marché. Il est possible de les classifier selon leur principe de mesure: induction magnétique, ultrason, pression différentielle, énergie mécanique ou puissance thermique.

Réaliser régulièrement une inspection basée sur l'exemple de grille terrain disponible à l'annexe 3.

5 DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Pour connaître la capacité d'une ou de plusieurs pompes d'un poste de pompage, on peut se référer aux courbes d'étalonnage caractéristiques de la pompe, fournies par le fabricant. Cette méthode peut cependant comporter plusieurs erreurs pouvant influencer considérablement l'exactitude de la mesure, par exemple l'usure du moteur de la pompe, l'usure de la pompe elle-même, la variation de la hauteur statique (hauteur d'eau de référence pour le niveau zéro), la viscosité du liquide, etc.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire dans un premier temps d'établir la capacité de la pompe à vitesse constante (Q_p) (aussi nommé « débit de pompage ») et non à en régler la capacité sur la base d'un étalon. Cette étape est parfois décrite, à tort, comme l'étalonnage de la pompe, mais l'étalonnage fait plutôt référence à l'établissement d'une relation entre le débit et d'autres variables (ex. : hauteur d'eau), et implique l'utilisation d'un étalon certifié.

5.1 CONDITIONS DE LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

La détermination de la capacité de la pompe doit s'effectuer selon les conditions suivantes :

- 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;
- La pompe est utilisée selon les conditions normales de fonctionnement (ex. : utilisation à la capacité habituelle de fonctionnement dans le cas d'une pompe à vitesse variable);
- La vitesse de la pompe est constante;
- Le type de poste de pompage (isolé ou non isolé) est considéré (le débit de remontée est additionné au débit de pompage);
- Les essais sont effectués pendant la vidange du poste et non pendant le remplissage;
- Les clapets de retenue sur la conduite de refoulement de la pompe sont étanches pour qu'il n'y ait pas de retour d'eau dans le poste de pompage;
- En présence de plus d'une pompe, la détermination de la capacité doit s'effectuer indépendamment sur chacune des pompes et en mode combiné. Par exemple, si deux pompes (A et B) fonctionnent en alternance et de façon simultanée, la détermination de la capacité devra se faire sur trois situations : pompe A seule, pompe B seule et pompes A et B simultanées.

5.2 MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ DE LA POMPE

La capacité d'une pompe s'établit par la méthode volumétrique ou la méthode utilisant un appareil de référence. Ces méthodes mettent en relation le volume pompé et la durée du pompage pour établir le débit de la pompe.

5.2.1 Méthode volumétrique

Le calcul de la capacité de la pompe selon la méthode volumétrique implique les étapes suivantes :

1° Calcul de la surface du poste de pompage (A)

L'équation permettant d'établir la surface (A) du poste de pompage est fonction de sa géométrie, comme le présentent les exemples du Tableau 28.

Tableau 28 : Équations déterminant la surface du poste de pompage

Poste rectangulaire	Poste circulaire
$A = L \times l$	$A = \frac{\pi D^2}{4}$
où A Surface du poste de pompage (ex. : m^2); L Longueur (ex. : m); l Largeur (ex. : m).	où A Surface du poste de pompage (ex. : m^2); D Diamètre (ex. : m); π Est égal à 3,1416.

2° Calcul de la hauteur d'eau pompée (h)

La hauteur (h) d'eau pompée résulte de la différence entre la hauteur d'eau dans le poste, au début (h_d) et à la fin (h_f) de l'essai (Figure 74). Les mesures de la hauteur d'eau devraient être réalisées avec des instruments de précision (ex. : télémètre laser) limitant l'incertitude de lecture à au plus 1 cm. Le tout se traduit par l'équation suivante :

$$h = h_d - h_f \quad (19)$$

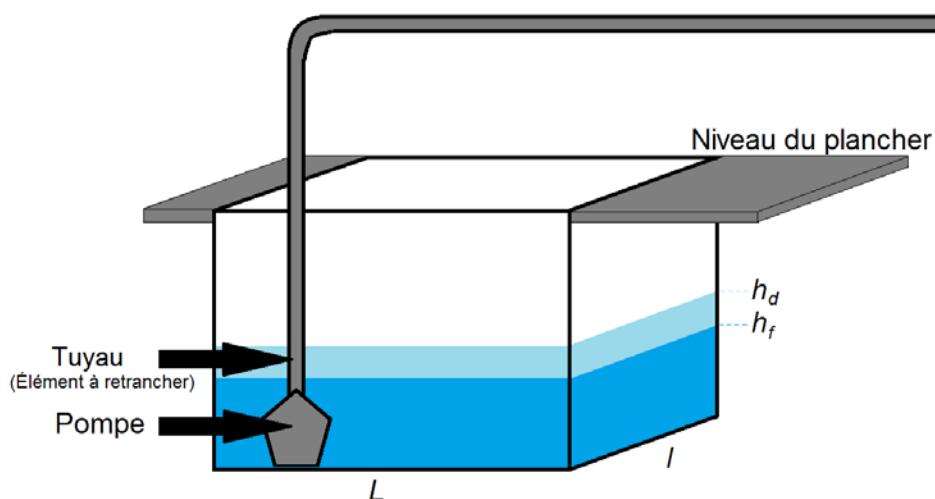


Figure 74 : Détermination de la capacité d'une pompe par la méthode volumétrique

3° Calcul du volume de pompage (V)

Pour calculer le volume de pompage, il faut combiner la surface du poste de pompage (A) (ex. : m^2) à la hauteur d'eau pompée (h) (ex. : m). Cette opération se traduit par l'équation suivante :

$$V = A \cdot h \quad (20)$$

Pour obtenir des résultats précis, il importe de soustraire le volume occupé par les pompes et tout autre accessoire, du volume total du poste de pompage.

4° Calcul du temps de pompage (t_p)

Le temps de pompage (t_p) représente le temps de fonctionnement de la pompe, soit l'intervalle entre le début (t_d) et la fin (t_f) de l'essai, et se résume à l'équation suivante :

$$t_p = t_f - t_d \quad (21)$$

Le calcul du temps de pompage se fait à l'aide d'un chronomètre capable de lire au moins 1/100 secondes (0,01 %).

5° Calcul de la capacité de la pompe (Q_p)

Il est préférable d'isoler le poste de pompage lors de l'établissement de la capacité de la pompe (Q_p), c'est-à-dire sans le débit d'eau entrant dans le puits de pompage.

Le calcul de la capacité de la pompe (Q_p) est différent selon qu'il s'agit d'un poste de pompage isolé ou non :

Poste de pompage isolé :

Dans un poste de pompage isolé, le remplissage et la vidange du poste se font de façon distincte. La capacité de la pompe est déterminée selon l'équation suivante :

$$Q_p = \frac{V}{t_p} \quad (22)$$

Où Q_p Capacité réelle de la pompe (ex. : m^3/s);

V Volume d'eau pompé (ex. : m^3);

t_p Temps de pompage (ex. : secondes).

Poste de pompage non isolé :

Lorsque le poste de pompage ne peut être isolé, cela signifie que le débit d'eau entrant dans le poste de pompage ne peut être éliminé pendant la vidange. Pour déterminer la capacité de la pompe, il faut :

- Établir le débit de remontée (aussi nommé « débit d'entrée »);
- Veiller à ce que le débit de remontée soit constant.

Pour établir le débit de remontée, il faut :

- Arrêter la pompe;
- Mesurer le temps de remontée (t_r), c'est-à-dire le temps requis pour que le niveau de l'eau dans le poste remonte d'une hauteur déterminée (h_r);
- Déterminer le débit de remontée (Q_r) selon l'équation suivante :

$$Q_r = \frac{V_r}{t_r} \quad (23)$$

Où Q_r Débit de remontée (ex. : m^3/s);
 V_r Volume de remontée ($V_r = A h_r$) (ex. : m^3);
 A Surface du poste de pompage (ex. : m^2);
 h_r Hauteur de remontée (ex. : m);
 t_r Temps de remontée (ex. : secondes).

On établit le débit de remontée en procédant à quelques vérifications (idéalement trois) afin de s'assurer qu'il est constant pour la suite des essais. Pour déterminer la capacité de la pompe, il est ensuite requis :

- D'établir le volume de pompage (V), comme il est précédemment décrit ($V = A h$);
- De déterminer le temps de pompage (t_p), c'est-à-dire le temps requis par la pompe pour transférer un volume (V) établi.

La capacité réelle de la pompe est déterminée selon l'équation suivante :

$$Q_p = Q_r + \frac{V}{t_p} \quad (24)$$

Où Q_p Capacité de la pompe (ex. : m^3/s);
 Q_r Débit de remontée (ex. : m^3/s);
 V Volume d'eau pompée (ex. : m^3);
 t_p Temps de pompage (ex. : secondes).

Les tableaux suivants illustrent un exemple où la capacité réelle de la pompe d'un poste de pompage isolé (Tableau 29) et d'un poste non isolé (Tableau 30) est déterminée à l'aide de la méthode volumétrique. La moyenne des trois essais permet d'établir la capacité de la pompe, soit 67,28 l/s pour l'exemple du Tableau 29 et 88,65 l/s pour celui du Tableau 30.

Tableau 29 : Exemple de détermination de la capacité de la pompe d'un poste isolé, à l'aide de la méthode volumétrique

Essais	1	2	3
Surface du poste de pompage (A) (m^2)	$6 \text{ m} \times 7,2 \text{ m} = 43,2$		
Hauteur d'eau pompée (h) (m)	0,60	0,53	0,58
Élément à retrancher	Pompe submergée de $0,3 \text{ m}^3$		
Volume d'eau pompée (V) (l)	25 620	22 596	24 756
Temps de pompage (t_p) (secondes)	368	354	362
Capacité de la pompe (Q_p) (l/s)	69,62	63,83	68,39

Tableau 30 : Exemple de détermination de la capacité de la pompe d'un poste non isolé à l'aide de la méthode volumétrique

Essais	1	2	3
Surface du poste de pompage (A) (m^2)	$6 \text{ m} \times 7,2 \text{ m} = 43,2$		
Hauteur d'eau pompée (h) (m)	0,60	0,53	0,58
Élément à retrancher	Pompe submergée de $0,3 \text{ m}^3$		
Temps de pompage (t_p) (secondes)	368	354	362
Volume d'eau pompée (V) (l)	25 620	22 596	24 756
Hauteur de remontée (h_r) (m)	0,14	0,17	0,16
Volume de remontée (V_r) (l)	5 748	7 044	6 612
Temps de remontée (t_r) (secondes)	300	300	300
Débit de remontée (Q_r) (l/s)	19,16	23,48	22,04
Capacité de la pompe (Q_p) (l/s)	88,78	87,31	90,43

5.2.2 Méthode utilisant un appareil de référence

La capacité d'une pompe peut être déterminée avec un appareil de référence qui effectue la mesure du volume en continu pendant une période donnée, simultanément à la vidange du poste de pompage par la pompe.

Comme présenté dans l'exemple de la Figure 75, l'appareil de référence (ex. : *clamp-on transit-time* ou Doppler) est installé temporairement sur une conduite fermée située en aval du poste de pompage.

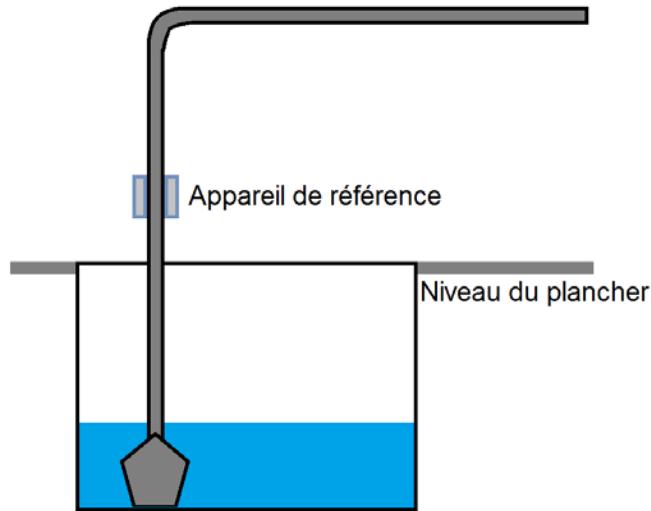


Figure 75 : Exemple d'installation impliquant un appareil de référence installé temporairement sur une conduite fermée

La mesure par l'appareil de référence permet d'obtenir un volume, qui est par la suite mis en relation avec la durée de l'essai (mesuré à l'aide d'un chronomètre) pour ainsi déterminer la capacité de la pompe. La capacité réelle de la pompe est déterminée selon l'équation suivante :

$$Q_p = \frac{V}{t_p} \quad (25)$$

Où Q_p Capacité de la pompe (ex. : m^3/s);
 V Volume d'eau pompé (ex. : m^3);
 t_p Temps de pompage (ex. : secondes).

L'utilisation de cette méthode est applicable au poste isolé ou non isolé. Dans ce dernier cas, il est toutefois nécessaire de considérer le débit de remontée (Q_r) décrit précédemment.

Le Tableau 31 présente un exemple où la capacité de la pompe est déterminée à l'aide de la méthode utilisant un appareil de référence. Dans cet exemple, la moyenne des trois essais de 30 minutes permet d'établir la capacité de la pompe à 84,35 l/s.

Tableau 31 : Exemple de détermination de la capacité d'une pompe à l'aide de la méthode utilisant un appareil de référence

Essais	1	2	3
Volume totalisé par l'appareil de référence (m^3)	151,5	150,8	153,2
Temps de pompage (secondes)	1 800	1 800	1 800
Capacité de la pompe (Q_p) (l/s)	84,17	83,78	85,11

5.2.2.1 Conditions d'utilisation de l'appareil de référence

Les conditions d'utilisation de l'appareil de référence dans le cadre de la détermination de la capacité d'une pompe sont les suivantes :

- L'erreur de mesure de l'appareil de référence doit être égale ou inférieure à 2,5 % (il s'agit de l'erreur qui fait généralement référence à la notion de « précision » décrite par le fabricant);
- L'appareil de référence doit être utilisé dans les conditions d'utilisation prescrites par le fabricant. Les paramètres à considérer diffèrent selon le type d'appareil de mesure utilisé et portent généralement sur :
 - Le diamètre intérieur de la conduite;
 - L'intervalle de mesure des vitesses;
 - La pression;
 - Les longueurs amont et aval sans perturbation (coude, valve, etc.);
 - Les propriétés de l'eau (turbidité, conductivité, température, etc.);
 - Les conditions d'écoulement;
 - Le matériau, l'état et l'épaisseur de la conduite.

Les paramètres applicables doivent être vérifiés au moment de l'essai pour qu'ils puissent être comparés aux conditions d'utilisation prescrites par le fabricant.

Le choix de l'appareil de référence doit toujours se porter sur celui dont les mesures sont affectées par le moins de paramètres possible ou par les effets les plus négligeables de ces paramètres;

- L'appareil de référence sélectionné doit être adapté au contexte *in situ* (configuration de l'installation, conditions normales d'écoulement, etc.);
- L'appareil de référence doit être étalonné annuellement ou à un intervalle de temps plus court lorsqu'un dérèglement de l'appareil est soupçonné. L'étalonnage doit s'effectuer en différents points sur sa plage de vitesses;

L'étalonnage de l'appareil de référence doit se faire selon des procédures reconnues telles que les normes ISO 4185 (méthode par pesée) et ISO 8316 (méthode par jaugeage d'un réservoir volumétrique) ou encore sur banc d'étalonnage comportant un étalon retracable²⁶ pour lequel un certificat d'étalonnage est délivré par le laboratoire accrédité responsable de l'étalonnage;

Les spécifications techniques ainsi que l'erreur de mesure de l'appareil de référence doivent apparaître dans le certificat d'étalonnage de cet appareil;

- L'organisme procédant à l'étalonnage de l'appareil de référence doit être certifié, c'est-à-dire lié à une référence nationale ou internationale (ex. : ISO 17025);
- On doit attendre que l'appareil de référence se stabilise avant de commencer les essais (ex. : 15 minutes dans des conditions environnantes stables).

²⁶ La traçabilité métrologique fait référence à la propriété d'un résultat de mesure qui peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure (VIM, 2012).

5.3 DURÉE DE L'ESSAI POUR LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Les calculs de temps peuvent se faire à l'aide d'un chronomètre, et celui-ci doit avoir une résolution d'au moins 1/100 secondes (0,01 %). Le volume d'eau pompé doit correspondre avec précision aux déclenchements de départ et de fin du chronomètre, lorsque la pompe fonctionne en régime permanent.

La précision de l'essai augmente en fonction de sa durée. Idéalement, la durée d'essai doit être de 30 minutes. Si la dimension du poste de pompage est limitée, une durée minimale de cinq minutes par essai est tout de même requise.

5.4 NOMBRE D'ESSAIS POUR LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Lors de l'établissement de la capacité d'un poste 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 utilisées au poste de pompage, lorsqu'applicable.

De plus, dans le cas d'une pompe à vitesse variable, trois essais doivent être faits pour chacune des vitesses d'utilisation visées.

Pour être acceptable, l'écart entre les valeurs minimale et maximale obtenu au cours des trois essais doit être inférieur ou égal à 10 %, selon l'équation suivante :

$$\% \text{ d'écart} = \frac{\text{débit min.} - \text{débit max.}}{\text{débit min.}} \times 100 \quad (26)$$

Lorsque l'écart est supérieur à 10 %, les essais doivent être repris. Le Tableau 32 présente un exemple où deux essais supplémentaires de 30 minutes doivent être faits.

Tableau 32 : Exemple de calcul d'écart entre les essais

Essai	Écart
Essai 1 = $800 \text{ m}^3 / 30 \text{ min} = 26,7 \text{ m}^3/\text{min}$ Essai 2 = $815 \text{ m}^3 / 30 \text{ min} = 27,2 \text{ m}^3/\text{min}$ Essai 3 = $725 \text{ m}^3 / 30 \text{ min} = 24,2 \text{ m}^3/\text{min}$	$\frac{24,2 \text{ m}^3/\text{min} - 27,2 \text{ m}^3/\text{min}}{24,2 \text{ m}^3/\text{min}} \times 100 = 12,4 \%$
Essai 4 = $732 \text{ m}^3 / 30 \text{ min} = 24,4 \text{ m}^3/\text{min}$	$\frac{24,4 \text{ m}^3/\text{min} - 27,2 \text{ m}^3/\text{min}}{24,4 \text{ m}^3/\text{min}} \times 100 = 11,5 \%$
Essai 5 = $779 \text{ m}^3 / 30 \text{ min} = 26,0 \text{ m}^3/\text{min}$	$\frac{26,0 \text{ m}^3/\text{min} - 27,2 \text{ m}^3/\text{min}}{26,0 \text{ m}^3/\text{min}} \times 100 = 3,8 \%$
Conclusion	Dans le présent cas, les essais 1, 2 et 5 sont retenus pour établir la capacité de la pompe : $26,6 \text{ m}^3/\text{min}$.

La moyenne des trois essais retenus représente le débit de la pompe.

5.5 FRÉQUENCE DE LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Une fréquence de trois ou quatre fois par année peut permettre de détecter des problèmes de pompe ou de moteur avant qu'une panne complète se produise. Cela permet aussi de vérifier l'apparition de fluctuations dans la capacité de la pompe.

S'il n'y a pas d'exigence de fréquence, la capacité de la pompe doit être réévaluée minimalement une fois par année, ou dans les situations suivantes :

- Mise en service d'une nouvelle pompe;
- Modification du mode de fonctionnement des pompes;
- Reconstruction d'une pompe;
- Préalablement à une vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit à l'aide de la méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage.

5.6 CAUSE D'ERREUR DANS LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Les sources d'erreur décrite dans les sections portant sur la méthode volumétrique et la méthode utilisant un appareil de référence s'appliquent selon le cas.

Les erreurs suivantes sont spécifiques à la détermination de la capacité de pompe :

- Le calcul du temps et du volume de pompage est fait alors que la pompe n'a pas atteint son régime permanent de fonctionnement;
- La vitesse de la pompe n'est pas constante;
- Les conditions d'utilisation de la pompe n'ont pas été prises en considération (ex. : vitesse variable, plus d'une pompe, etc.);
- Le débit de remontée n'est pas considéré pour le poste non isolé;
- Le débit de remontée n'est pas constant;
- Le calcul du débit de remontée est erroné (ex. : outils inadaptés, erreur de calcul, etc.);
- Le nombre d'essais ou leur durée sont inadéquats;
- Les clapets de retenue sur la conduite de refoulement ne sont pas étanches.

Détermination de la capacité d'une pompe...

Se fait lorsque :

- la pompe est utilisée dans des conditions normales et qu'elle a atteint un régime de fonctionnement permanent
- la vitesse de la pompe est constante
- le type de poste est considéré (isolé / non isolé)
- le poste de pompage est en vidange et non en remplissage
- il n'y a pas de retour d'eau dans le poste de pompage



S'établit sur la base de 2 méthodes :

- volumétrique
- utilisation d'un appareil de référence étalonné

Effectuée à partir de 3 essais, d'une durée idéale de 30 minutes, et présentant un écart < 10 % entre des valeurs min. et max. obtenues au cours des 3 essais.

L'annexe 4 présente un exemple de grille terrain.

6 VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE D'UN SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT OU DU VOLUME

6.1 INTRODUCTION

Les méthodes de mesure du débit ou du volume²⁷ traitées dans cette section ne nécessitent aucune installation d'élément primaire et permettent d'obtenir de façon ponctuelle le débit de l'écoulement ou le volume cumulé.

La présente section porte sur l'utilisation de ces méthodes de référence dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit visant à en valider la conformité en fonction des exigences applicables (ex. : règlements, autorisations, directives, lignes directrices, etc.). Les méthodes de référence reconnues par le Ministère et décrites dans les prochaines sections sont les suivantes :

- Exploration du champ des vitesses (section 7);
- Dilution d'un traceur (section 8);
- Volumétrique (section 9);
- Capacité de la pompe (section 10);
- Appareil de référence (section 11).

Pour que le résultat d'une vérification de l'exactitude soit accepté, les conditions d'application de la méthode de référence sélectionnée doivent être respectées.

La vérification d'un système de mesure effectuée à l'aide d'une double installation, c'est-à-dire d'un équipement de mesure installé de façon permanente mais servant d'élément comparatif avec l'équipement de mesure officielle (ex. : élément primaire et élément secondaire installés en amont ou en aval de l'équipement en vérification), n'est pas considérée comme étant une méthode de référence reconnue par le Ministère. En effet, en cas de discordance entre les deux installations, il devient souvent impossible de trouver l'installation défaillante sans une nouvelle vérification avec une autre méthode de référence. Cependant, la vérification effectuée à l'aide d'un deuxième appareil devient possible si les conditions d'application de la méthode utilisant un appareil de référence présentée à la section 11 sont respectées.

La section 12 décrit le contenu du rapport à produire lors d'une vérification d'un système de mesure du débit ou du volume dans des écoulements à surface libre ou sous pression.

6.2 SCHÉMATISATION D'UNE VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE D'UN SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT

La vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit implique la vérification de ses composantes, qui peuvent être différentes en fonction d'un système installé en conduite découverte ou en conduite fermée. La Figure 76 présente de façon schématisée le processus de vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit et les sections suivantes décrivent plus en détail les éléments constituant le schéma.

²⁷ Pour la suite du texte, l'expression « système de mesure du débit » inclut « système de mesure du volume ».

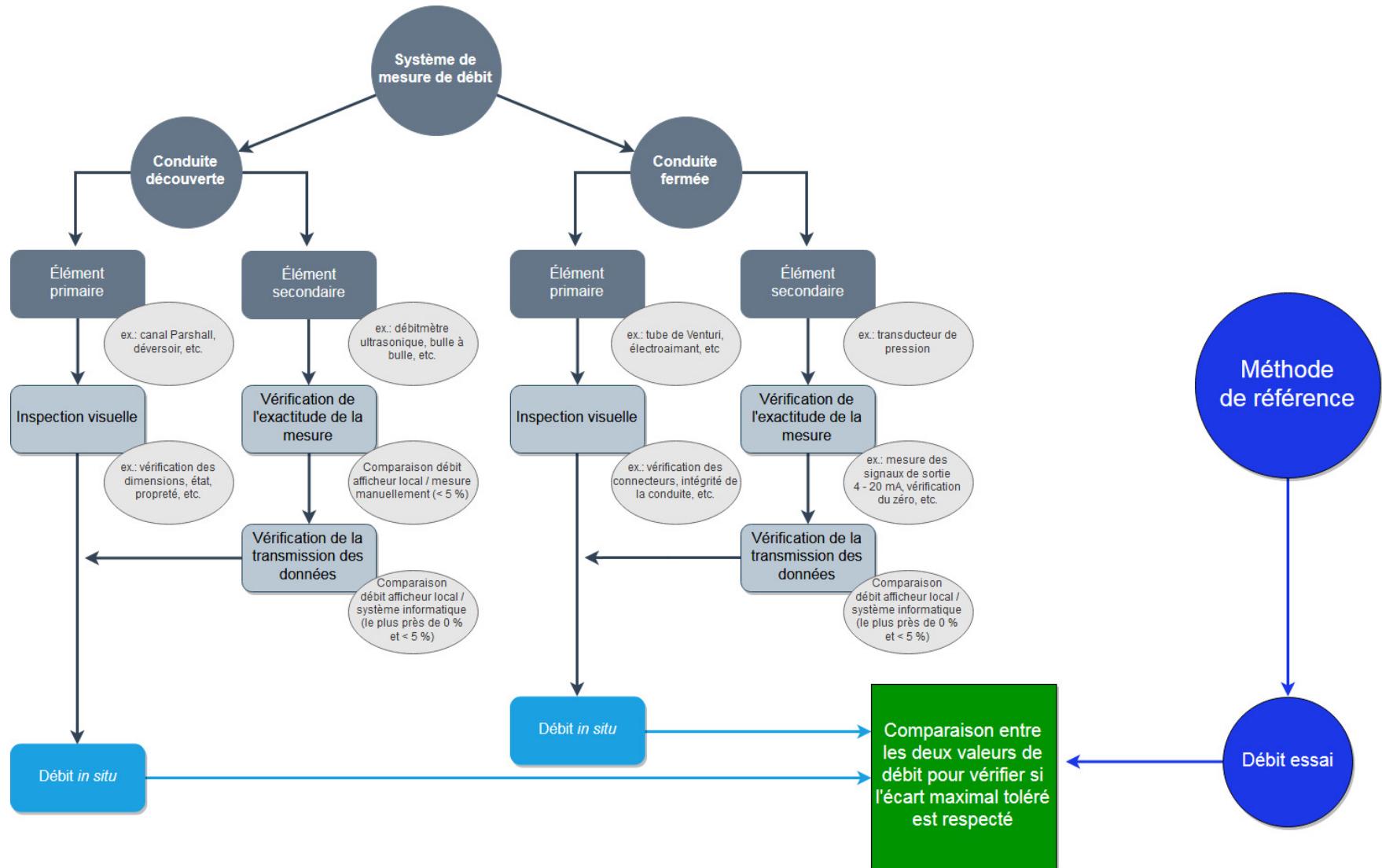


Figure 76 : Schématisation de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit en conduite découverte ou fermée

6.3 GÉNÉRALITÉS

6.3.1 Système de mesure du débit

Un système de mesure du débit est constitué de l'ensemble des éléments permettant de faire la mesure (éléments primaire et secondaire), l'affichage, la transmission et l'enregistrement du débit.

L'élément primaire est le dispositif physique qui modifie l'écoulement de l'eau et qui engendre le signal initial permettant la détermination du débit. L'élément secondaire mesure ce signal, c'est-à-dire la valeur physique (ex. : hauteur d'eau, vitesse, etc.), qui s'établit au point de mesure de l'élément primaire, l'affiche, l'enregistre, le traite ou le transmet dans le but d'obtenir la valeur du débit.

En conduite découverte, la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit doit inclure la vérification de l'exactitude de la mesure de l'élément secondaire en plus de la vérification de l'exactitude de l'élément primaire. Ces vérifications peuvent être réalisées de façon indépendante. Par contre, lorsque l'élément secondaire *in situ* sert à établir le débit de l'essai, son exactitude doit être vérifiée et les ajustages apportés (lorsque requis) préalablement aux essais sur l'élément primaire. L'élément secondaire sur une conduite fermée est plus difficile à distinguer de l'élément primaire, ce qui fait qu'il ne peut être utilisé pour établir le débit de l'essai. Dans ce cas, la vérification de l'exactitude de l'élément secondaire fait partie intégrante de la vérification de l'exactitude de l'élément primaire, bien que certaines vérifications de routine puissent être effectuées (comme décrit à la section 2.9.2.).

6.3.2 Débit de l'essai (volume cumulé)

Dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit, le « débit de l'essai » fait référence au volume cumulé ou à la mesure ponctuelle du débit effectuée à l'aide d'une méthode de référence reconnue par le Ministère. Cette méthode permet d'établir le volume d'eau ou le débit qui s'est écoulé pendant la période de l'essai.

Pour obtenir un débit d'essai représentatif des conditions d'écoulement, il est essentiel de respecter les conditions d'application des différentes méthodes décrites aux sections 7 à 11.

6.3.3 Débit *in situ*

Dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit, le « débit *in situ* » fait référence au volume cumulé ou à la mesure ponctuelle du débit obtenue par le système de mesure du débit en vérification, c'est-à-dire celui de l'entreprise (ex. : usine) ou de la municipalité, par exemple.

En fonction des équipements composant le système de mesure du débit, le débit *in situ* peut être obtenu, par exemple :

- Par un poste de pompage dont la capacité de la pompe et le temps de fonctionnement sont connus;

- Par un débitmètre installé sur une conduite fermée;
- Par l'élément primaire jumelé à l'élément secondaire permanent en vérification et faisant partie du système de mesure du débit en conduite découverte;
- Par l'élément primaire permanent en vérification, jumelé à un élément secondaire installé temporairement pour les besoins de la vérification de l'exactitude de l'élément primaire.

6.4 ÉTAPE DE LA VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE D'UN SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT

L'installation du système de mesure *in situ* doit être vérifiée. On doit ainsi s'assurer qu'elle est conforme aux prescriptions du fabricant (ex. : dimensions, matériau, longueurs amont et aval, etc.).

6.4.1 Inspection visuelle de l'élément primaire

En conduite fermée, l'inspection visuelle permet de vérifier l'intégrité de la conduite et des éléments externes (ex. : vérification des connecteurs).

Pour ce qui est d'une installation en conduite découverte, l'inspection visuelle permettra de vérifier l'état et la propreté de cette installation, de comparer les dimensions réelles aux dimensions théoriques, de confirmer si la structure est de niveau (longitudinalement, transversalement, verticalement) et de vérifier les conditions d'écoulement (ex. : libre ou noyé, courant préférentiel, etc.).

6.4.2 Vérification de l'exactitude de la mesure de l'élément secondaire

En conduite fermée, on peut valider l'exactitude d'un élément secondaire en vérifiant la mesure des signaux de sortie (4-20 mA, impulsions ou numériques) et en procédant à la vérification du zéro de l'appareil.

Pour une conduite découverte, cette vérification est effectuée par la comparaison du débit de l'afficheur local avec celui de la mesure manuelle. L'écart obtenu doit être le plus près possible de zéro et inférieur à 5 %. Cette vérification est possible en présence d'eau ou à sec. La vérification à sec permet d'éviter des perturbations de l'écoulement qui pourraient rendre difficile la lecture de la hauteur d'eau sur une règle.

Dans le premier cas, la hauteur d'eau réelle est mesurée manuellement à quelques reprises (ex. : 1 mesure toutes les 30 secondes pendant 5 minutes) au point de mesure de l'élément primaire (ex. : règle), alors que dans l'autre cas, il s'agit d'une hauteur d'eau simulée (ex. : plaque de référence). Simultanément, les mesures affichées à l'élément secondaire sont notées. Plus il y aura de prises de mesures, plus les valeurs extrêmes auront un effet moindre et plus la moyenne sera représentative, particulièrement en présence de hauteurs d'eau variables, de turbulences ou d'un délai de transmission des mesures. Un minimum de cinq mesures comparatives est recommandé. L'annexe 3.6 présente un exemple de grille d'inspection et de vérification de l'exactitude d'un élément secondaire.

Le calcul d'erreur doit se faire sur les valeurs de débits et non sur celles de hauteurs d'eau. Ainsi, si l'afficheur local offre uniquement la hauteur d'eau, celle-ci doit être convertie en débit à l'aide de l'équation théorique ou de la courbe hauteur – débit de l'élément primaire en place.

Le Tableau 33 présente les données brutes d'un exemple de vérification de l'exactitude de la mesure d'un élément secondaire installé sur une conduite découverte, effectuée à l'aide d'une règle et utilisant les débits instantanés d'un afficheur local.

Tableau 33 : Exemple de vérification d'un élément secondaire à l'aide d'une règle

Heure (h:min:sec)	Hauteur manuelle (m)	Débit instantané théorique ¹ (m ³ /h)	Débit instantané appareil ² (m ³ /h)	Écart ³ (%)
09:00:00	0,160	75,83	76,00	-0,22
09:00:30	0,161	75,58	76,16	-0,77
09:01:00	0,161	75,58	76,09	-0,68
09:01:30	0,160	75,83	76,01	-0,24
09:02:00	0,163	78,09	78,23	-0,18
09:02:30	0,165	79,61	80,03	-0,53
09:03:00	0,164	78,85	78,97	-0,15
09:03:30	0,160	75,83	76,13	-0,40
09:04:00	0,159	75,09	76,06	-1,29
09:04:30	0,160	75,83	76,20	-0,49
09:05:00	0,163	78,09	78,27	-0,23
Moyenne	0,162	76,75	77,11	-0,47

Notes :

¹ Basé sur la formule théorique de l'élément primaire en place, appliquée à la hauteur d'eau mesurée manuellement par la règle installée au point de mesure.

² Valeurs de débit de l'afficheur local de l'appareil de mesure en vérification notées simultanément aux mesures manuelles de hauteurs d'eau.

³ Le pourcentage d'écart est obtenu par l'équation suivante :

$$\left(\frac{\text{débit instantané théorique} - \text{débit instantané appareil}}{\text{débit instantané théorique}} \right) \times 100$$

Si l'écart calculé entre les valeurs découlant de mesures manuelles et celles affichées par l'appareil est inférieur à 5 %, ce dernier peut être utilisé pour mesurer le débit *in situ* dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit. Dans le cas contraire,

il ne pourra être utilisé à moins d'être préalablement ajusté, étalonné, remplacé ou réparé selon le problème identifié.

À noter qu'il est commun qu'un appareil temporaire soit utilisé pour les besoins de la mesure du débit *in situ*, et que cette façon de faire est acceptable, tant que l'appareil est ajusté pour l'élément primaire en place et que sa mesure présente un écart inférieur à 5 %.

L'exemple du Tableau 34 compare l'écart obtenu lorsque le calcul est effectué à partir des données de hauteur d'eau et de débit. Cet exemple démontre que l'écart de 5 % peut être respecté lorsque la comparaison est faite avec la hauteur d'eau, mais qu'il peut être supérieur à 5 % lorsque la comparaison est faite à partir des débits. Cet exemple confirme l'importance de faire la comparaison à partir des valeurs de débits plutôt qu'avec les hauteurs d'eau.

Tableau 34 : Comparaison de l'écart obtenu sur les valeurs de hauteurs d'eau et de débits, basée sur l'équation théorique d'un canal Parshall de 0,914 m

	Mesure manuelle	Équipement de mesure <i>in situ</i>	Écart (%)
Hauteur d'eau (m)	0,355	0,370	4,23
Débit (m ³ /h)	1 553	1 657	6,70

6.4.3 Vérification de la transmission au système informatique

Les résultats de débit et de volume qui prévalent aux fins de l'essai sont ceux affichés par l'appareil de mesure *in situ*. Si celui-ci est relié à un système de transmission des données à distance, on doit effectuer une vérification supplémentaire afin de s'assurer qu'aucun écart n'apparaît dans la transmission des données entre l'appareil *in situ* et le système de transmission.

Dans tous les cas, la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit implique de vérifier l'exactitude de la transmission des données au système informatique (ex. : synchronisation des heures, délai de transmission, etc.). L'écart entre les données de l'afficheur local permanent et du système informatique devrait être près de zéro et en tout temps inférieur à 5 %. Dans le cas contraire, on doit apporter des ajustements avant de procéder aux essais.

6.4.4 Vérification de l'exactitude de l'élément primaire

La vérification de l'exactitude d'un élément primaire se fait par comparaison du débit mesuré par le système en vérification (débit *in situ*) avec le débit obtenu simultanément par l'une des méthodes de référence reconnues par le Ministère (débit de l'essai). Cette vérification ne peut donc pas être effectuée à sec.

6.4.5 Calcul de l'écart sur le système de mesure du débit en vérification

Le débit mesuré par la méthode de référence (débit de l'essai) est considéré comme étant la « valeur de référence ». Si les critères de la méthode sont appliqués, la valeur mesurée est

considérée comme étant une mesure représentative de la réalité, bien qu'elle ne soit pas considérée comme étant une « valeur vraie » sur la base des principes de métrologie. Le calcul de l'erreur entre le débit de l'essai et le débit *in situ* permet donc de déterminer si l'exactitude du système de mesure du débit en vérification *in situ* respecte les exigences.

L'écart d'une des composantes du système de mesure du débit ne peut compenser l'écart de l'autre. Par exemple, un écart de -5 % sur l'élément secondaire ne peut permettre de compenser un écart de 15 % sur un élément primaire dans le but de respecter une exigence de 10 %.

Le résultat obtenu par le débit de l'essai est considéré comme étant le plus précis, le calcul du pourcentage d'écart se fait donc selon la formule suivante :

$$\% \text{ d'écart} = \left(\frac{\text{débit de l'essai} - \text{débit in situ}}{\text{débit de l'essai}} \right) \times 100 \quad (27)$$

Le calcul pour chaque essai doit intégrer les incertitudes, lorsqu'appliquables.

6.5 NOMBRE D'ESSAIS ET INTERVALLE DE MESURE DU DÉBIT LORS DES ESSAIS

La vérification effectuée à un seul niveau de débit permet d'établir la conformité de l'élément primaire uniquement pour la gamme de débits qui prévalait au cours des essais. Par exemple, trois essais effectués à environ 85 % de la capacité d'un canal jaugeur permet de connaître son exactitude à ce niveau de débit, mais ne permet pas de conclure sur son exactitude lorsque le canal est utilisé à 20 % de sa capacité.

Il est donc recommandé de procéder à des essais à différents niveaux de débit s'étendant sur l'intervalle de mesure du système de mesure du débit *in situ* et correspondant à l'intervalle habituel d'écoulement. Par exemple, trois niveaux de débit peuvent être sélectionnés, qui correspondront aux débits minimal, moyen et maximal.

Le nombre d'essai doit être respecté pour chacune des méthodes et en fonction des exigences particulières de suivi (ex. règlement).

Pour chacune des méthodes de référence, trois essais sont généralement requis (un essai par niveau de débit [min / moy / max], ou trois essais pour un seul niveau de débit). La seule exception concerne la méthode d'exploration du champ des vitesses où un seul essai est acceptable si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, trois essais doivent être effectués.

En résumé, lorsque la vérification est effectuée à un seul niveau de débit, trois essais sont réalisés à ce même niveau. S'il est possible de procéder à des essais à différents niveaux de débit, un seul essai peut être effectué par niveau si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, il peut être requis de procéder à trois essais pour un des niveaux de débit afin de s'assurer de la validité des résultats.

6.6 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La Figure 77 présente un exemple de schéma décisionnel permettant de conclure sur les actions à poser relativement à un système de mesure du débit en fonction du résultat obtenu lors d'une vérification de l'exactitude.

Lorsque le pourcentage d'écart obtenu entre le débit de l'essai et le débit *in situ* respecte l'écart maximal toléré, le système de mesure du débit *in situ* est considéré comme étant conforme. Des recommandations mineures peuvent être formulées pour que des améliorations à l'installation (ex. : amélioration des conditions d'approche) soient apportées.

Par contre, dans le cas où le pourcentage d'écart obtenu ne respecterait pas les exigences, il est pertinent de valider dans un premier temps si la méthode de référence utilisée est appropriée à l'installation *in situ* ainsi qu'aux conditions en place et si cette méthode a été appliquée selon les exigences.

Selon le cas, il peut être nécessaire de reprendre la vérification dans son ensemble (ou seulement un des essais) à l'aide de la même méthode, ou encore de refaire une vérification complète avec une méthode de référence plus appropriée aux conditions. Si le choix ou l'application de la méthode ne sont pas mis en cause, il est alors possible de conclure que le système de mesure n'est pas conforme et de formuler les recommandations nécessaires pour que la situation soit corrigée.

6.7 ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ DE L'INSTALLATION

Le pourcentage d'écart obtenu doit respecter l'écart maximal toléré pour chacun des essais et non pour la moyenne des essais. Le Tableau 35 illustre un exemple où il n'est pas possible de conclure que l'installation est conforme. En effet, bien que la moyenne de 7,5 % obtenue pour les trois essais respecte l'exigence réglementaire de 10 %, le résultat de 15,0 % du troisième essai est supérieur à cette exigence. Dans un tel cas, un autre essai doit être réalisé.

Tableau 35 : Exemples de résultats de trois essais

Essai	Écart (%)
1	3,5
2	4,5
3	15,0
Moyenne	7,5

6.8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS À LA SUITE DE LA VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE DU SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT

Une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit implique la formulation d'une conclusion indiquant si le système de mesure en place est conforme aux exigences et s'il permet

d'obtenir des données fiables. De plus, des recommandations et des correctifs doivent être énoncés lorsque requis.

Les correctifs mineurs tels que des réglages de l'appareil doivent être apportés sans délai. Les réétalonnages sur banc hydraulique, les remplacements et les réparations doivent être faits dans un délai raisonnable, en conformité avec les exigences applicables. Dans tous les cas et selon le délai prescrit par la réglementation, on doit reprendre la procédure de vérification de l'exactitude à la suite des correctifs afin de s'assurer que le système de mesure respecte l'écart maximal toléré.

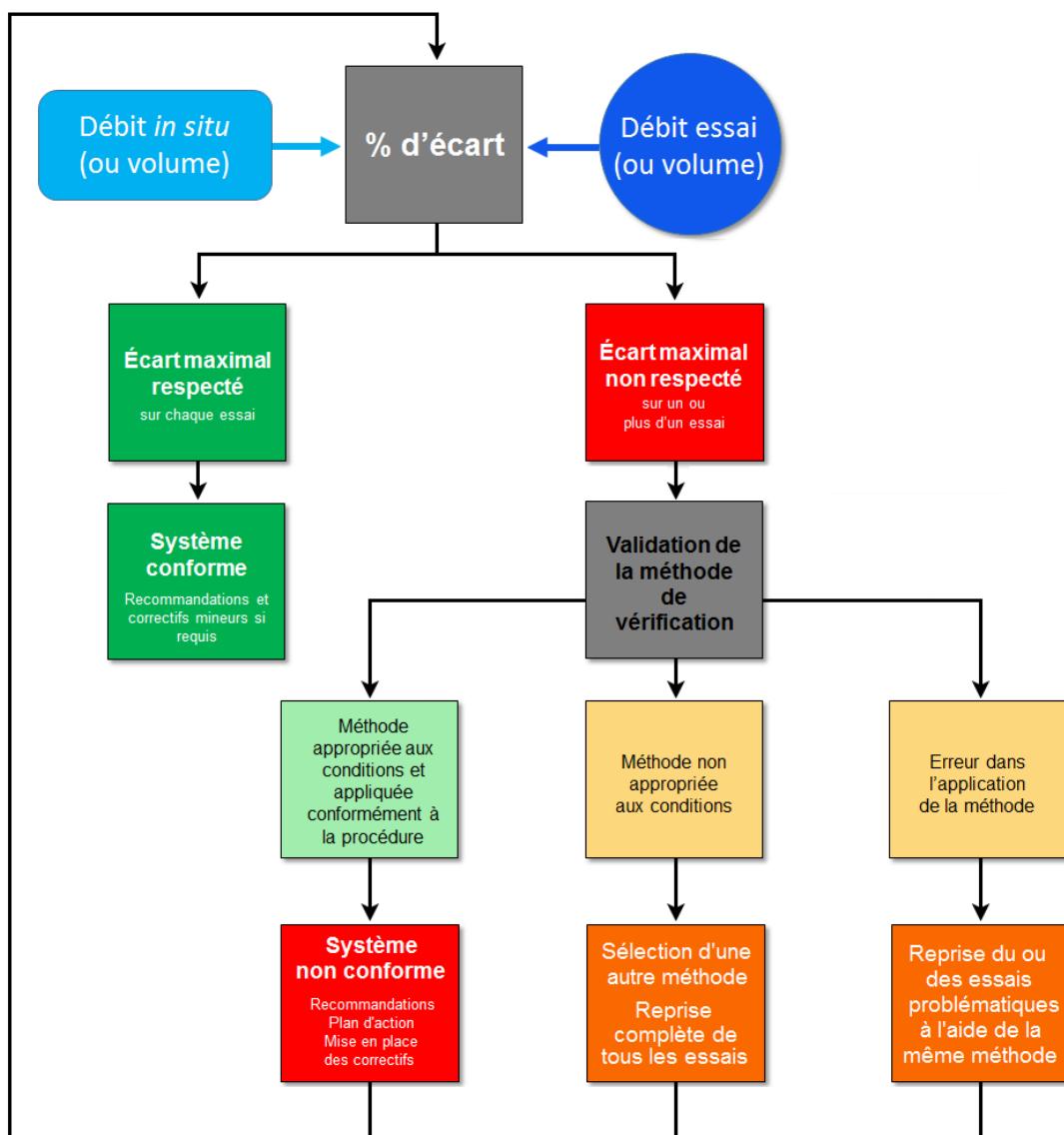


Figure 77 : Schéma décisionnel des actions à poser selon les résultats de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit

Vérification de l'exactitude...

La vérification d'un système de mesure du débit comprend :

- l'inspection visuelle de l'élément primaire
- la vérification de l'exactitude de la mesure de l'élément secondaire
- la vérification de la transmission au système informatique
- la vérification de l'exactitude de l'élément primaire effectuée par le calcul de l'écart entre la valeur obtenue par le système *in situ* et par la méthode de référence reconnue par le Ministère (exploration du champ des vitesses, dilution d'un traceur, volumétrique, capacité de la pompe ou appareil de référence).



Le nombre d'essai requis en fonction de la méthode de référence sélectionnée ou selon les particularités des exigences de suivi (ex. règlement) doit être respecté

Les méthodes de référence reconnues sont décrites aux sections 7 à 11.

7 MÉTHODE D'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES

La méthode d'exploration du champ des vitesses, aussi appelée « méthode de distribution des vitesses » ou « méthode de détermination aire-vitesse », est utilisée pour déterminer le débit des écoulements à surface libre.

Dans une aire d'écoulement, la vitesse de l'écoulement n'est pas considérée comme uniforme sur la totalité de son axe transversal. La Figure 78 illustre des exemples de distribution des vitesses dans une aire d'écoulement.

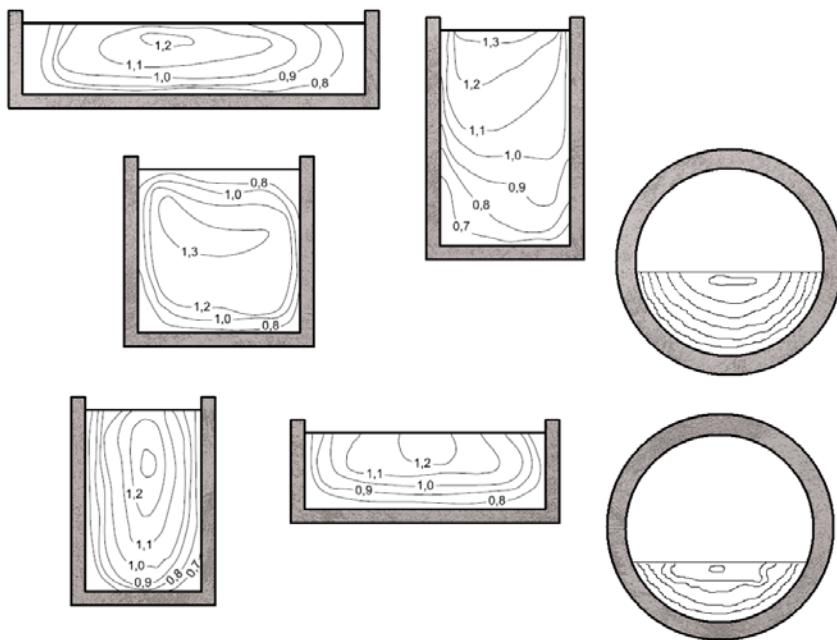


Figure 78 : Exemples de distribution des vitesses dans une aire d'écoulement

Ainsi, la méthode d'exploration du champ des vitesses consiste à déterminer le débit à partir de l'aire transversale (obtenue par le produit de la largeur de la section mouillée et de la hauteur d'écoulement) et de la vitesse d'écoulement dans la section transversale. Une mesure de débit peut donc être obtenue sans qu'un élément primaire (ex. : canal Parshall) soit requis. Cela peut aussi permettre d'établir une mesure de débit indépendante qui sera utilisée en tant que méthode de référence dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit.

Lorsque la méthode d'exploration du champ des vitesses est utilisée dans un canal de forme régulière et définie (ex. : canal rectangulaire), une équation simplifiée peut être utilisée pour le calcul du débit :

$$Q = \bar{v} \times A \quad (28)$$

Où \bar{v} Débit (ex. : m^3/s);

\bar{v} Vitesse moyenne de l'écoulement dans la section mouillée (ex. : m/s);

A Aire de la section mouillée (section de mesurage) (ex. : m^2).

Dans un cours d'eau ou une structure à profondeur variable, on obtient le débit total en faisant la somme des débits unitaires de chacune des zones d'application des verticales.

Les débits unitaires sont obtenus par différentes méthodes de calcul, dont les méthodes graphique et arithmétique (méthode de la section moyenne et méthode de la section médiane). Pour plus de détails sur ces méthodes, on se référera à la norme ISO 748.

En appliquant la méthode d'exploration du champ des vitesses à différents débits dans un canal de forme définie, on peut établir une relation hauteur – débit, exprimée sous la forme d'une courbe d'étalonnage (Figure 79), d'une équation ou d'une table hauteur – débit, qui peut servir par la suite à déterminer le débit uniquement par la mesure de la hauteur d'eau.

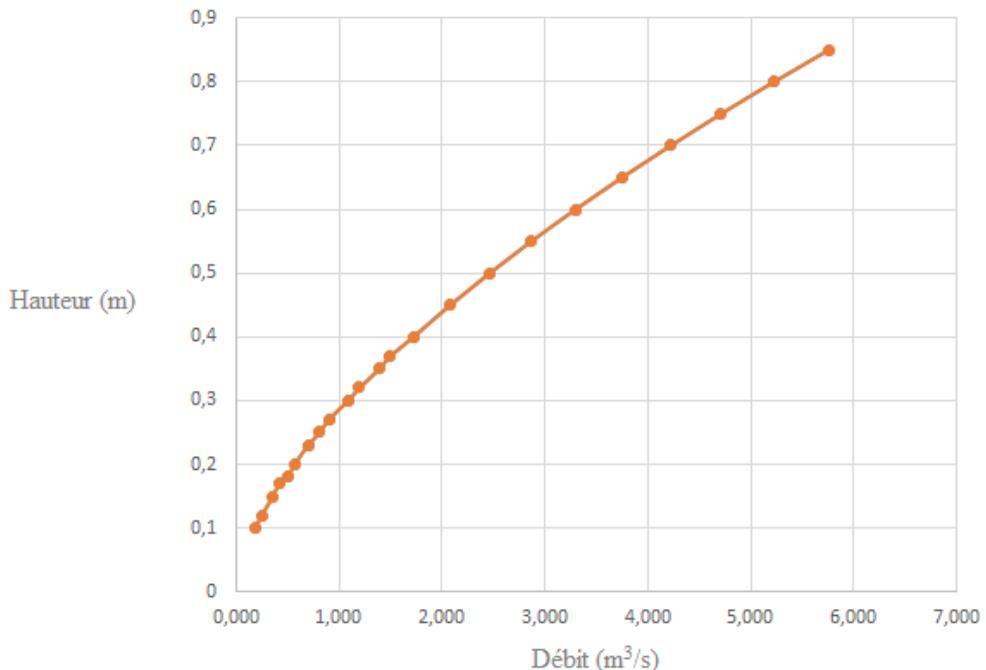


Figure 79 : Exemple de courbe hauteur – débit

La méthode d'exploration du champ des vitesses peut s'effectuer à partir d'appareils submersibles ou encore par des mesures de surfaces dont l'intégration de la vitesse moyenne de l'écoulement tient compte de la profondeur d'eau à la section de mesurage. Cette méthode permet de mesurer la vitesse dans une zone d'échantillonnage et d'extrapoler la mesure de vitesse moyenne de l'écoulement à l'ensemble de la section mouillée.

Les zones échantillonnées sont fonction des dimensions de l'aire d'écoulement ainsi que du type, de la position et des caractéristiques du capteur de l'appareil.

Différents équipements permettent l'application de cette méthode et ils se répartissent comme suit dans ce document :

- Moulinet rotatif (aussi nommé courantomètre mécanique);

- Moulinet électromagnétique (aussi nommé courantomètre électromagnétique);
- Vélocimètre acoustique Doppler (aussi nommé courantomètre acoustique);
- Débitmètres hauteur – vitesse Doppler et profileur de courant ADCP;
- Débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar.

La Figure 80 résume les principales caractéristiques des appareils de mesure décrits dans la présente section.

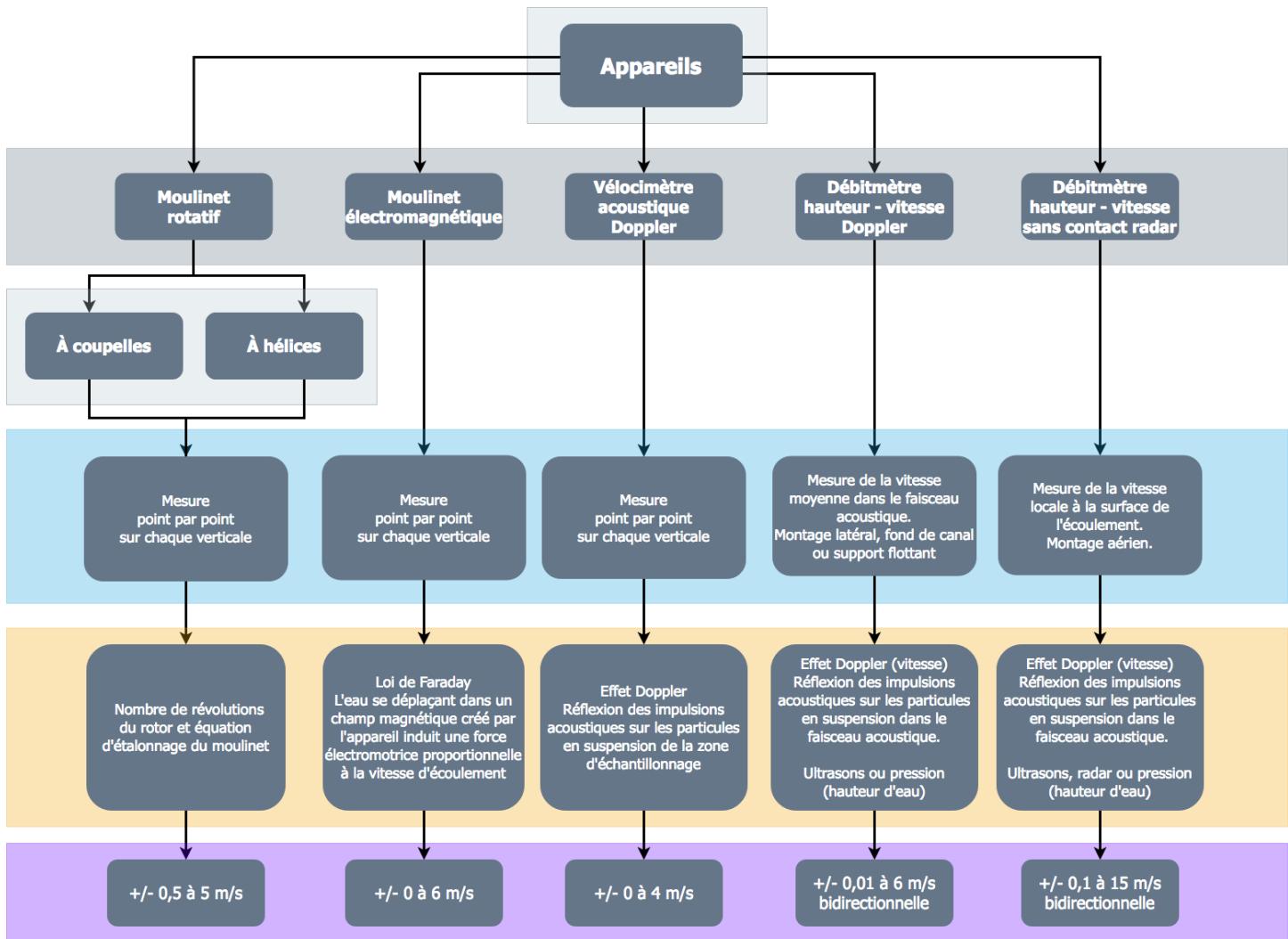


Figure 80 : Caractéristiques des appareils de mesure

Il existe d'autres méthodes de mesure qui ne sont pas reconnues aux fins de vérification d'un système de mesure et celles-ci ne sont pas présentées dans ce document. Parmi ces méthodes se trouve le jaugeage au flotteur (ISO 748), qui ne devrait être utilisé que dans le cas de reconnaissance préalablement à l'application d'une autre méthode de mesurage. La mesure de la vitesse par analyse d'image constitue un autre exemple de méthode permettant d'estimer le débit en temps réel, notamment en cas de crue importante lorsque les autres méthodes plus

intrusives représentent un risque. Cette méthode est pour le moment encore au stade exploratoire.

Un exemple de grille terrain basée sur l'application d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit à l'aide de la méthode d'exploration du champ des vitesses est présenté à l'annexe 5. Aussi, un exemple de grille de compilation des données brutes lors de l'application de la méthode de mesurage de la vitesse par verticale est aussi donné.

7.1 ÉQUIPEMENTS DE MESURE UTILISÉS POUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE D'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES

7.1.1 Moulinet rotatif (aussi nommé courantomètre mécanique)

Description

Le moulinet rotatif est un appareil muni d'un rotor dont la vitesse de rotation est fonction de la vitesse locale de l'écoulement du fluide dans lequel il est immergé. Lorsque la profondeur d'eau le permet, le moulinet est installé sur une perche permettant à l'opérateur de procéder aux mesures à partir d'une passerelle, d'un pont ou encore à pied dans l'écoulement.

Il en existe deux types : le moulinet à coupelles (Figure 81) et le moulinet à hélices (Figure 82). Le moulinet à coupelles est un moulinet dont le rotor est constitué d'une roue comportant habituellement six coupelles creuses ou pleines, tournant sur un axe vertical lorsqu'il est placé dans l'écoulement. Pour sa part, le rotor du moulinet à hélices est constitué de deux ou de plusieurs pales ou encore de pales à vis hélicoïdale qui tournent généralement sur un axe horizontal.

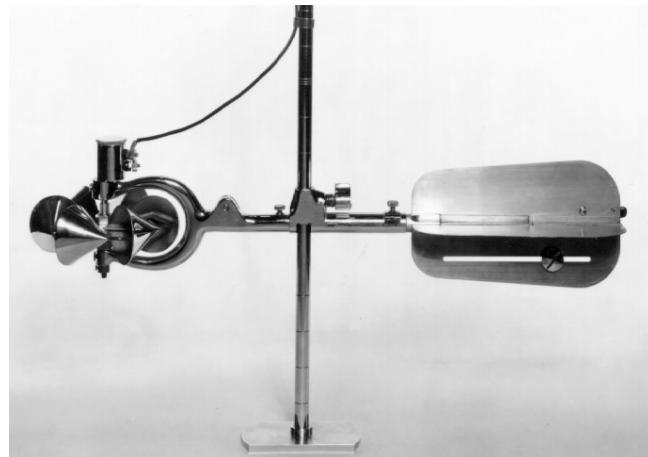


Figure 81 : Moulinet rotatif à coupelles

Fournie par : Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior



Figure 82 : Moulinet rotatif à hélices (OTT C31)

Fournie par : OTT Hydromet, Allemagne

Le moulinet à hélices peut être équipé d'une seule hélice ou en avoir plusieurs interchangeables qui possèdent chacune des caractéristiques différentes (diamètre, vitesses maximales, angle d'incidence ou effet autocomposant, etc.). Dans ce cas, il est donc possible de mesurer, à partir du même moulinet, différentes gammes de vitesses et différentes conditions d'écoulement, tant que la charte d'étalonnage de chaque hélice est disponible.

Principe de fonctionnement

La vitesse de l'écoulement est déterminée par le comptage du nombre de révolutions du rotor pendant un intervalle de temps donné. La vitesse de l'écoulement est déduite par l'équation d'étalonnage du moulinet.

Le débit de l'écoulement à l'aide d'un moulinet rotatif est obtenu avec les variables suivantes :

- La largeur de la section de mesurage;
- La hauteur d'eau de l'écoulement;
- La vitesse de l'écoulement.

Par la suite, on applique l'équation 28 décrite précédemment afin d'obtenir le débit de chacune des sections de l'écoulement. On calcule le débit de l'essai en faisant la somme des produits de la vitesse et de l'aire correspondante (moyenne des hauteurs d'eau durant l'essai multipliée par la largeur de la section de mesurage) pour une série de relevés dans la section de mesurage (Figure 83).

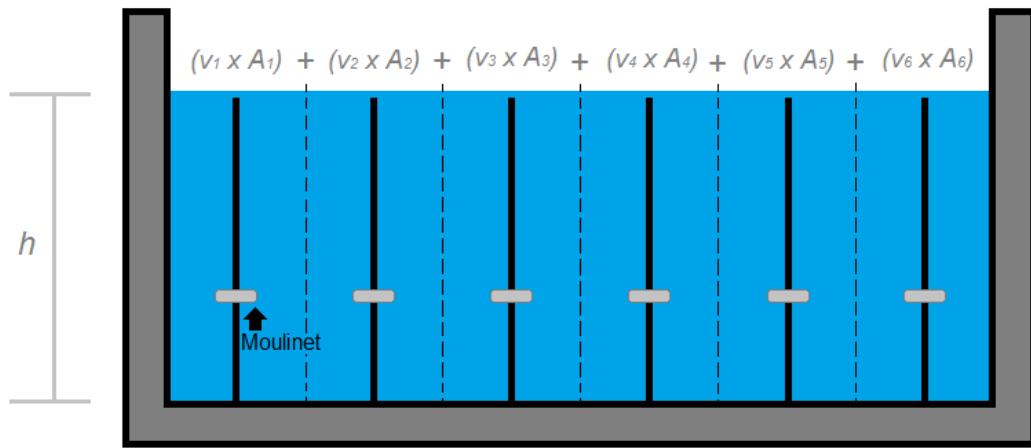


Figure 83 : Calcul du débit de l'essai à partir de la somme des débits de chacune des sections

Conditions d'utilisation

Le fabricant doit fournir avec l'appareil la table d'étalonnage basée sur les tests d'étalonnage menés par un laboratoire reconnu.

Le bon fonctionnement du moulinet doit être vérifié préalablement à chaque utilisation. Par exemple, on devra :

- Procéder à un essai de rotation de l'hélice (ou de la coupelle) en la faisant tourner manuellement tout en observant son mouvement afin de s'assurer d'un arrêt graduel plutôt que brusque;
- S'assurer de la lubrification adéquate des pièces;
- Vérifier l'enregistrement des rotations au compteur;
- Vérifier la condition des ailettes de l'hélice; si elles sont altérées, l'appareil devra être réétalonné.

Lorsqu'il est démontré que l'appareil a un problème de fonctionnement, il doit être réparé et étalonné par le manufacturier ou par un laboratoire de métrologie accrédité (ex. : Service national d'étalonnage, Environnement et Changement climatique Canada).

Pendant les essais, généralement après chaque verticale, on doit vérifier le moulinet afin de s'assurer que l'hélice tourne toujours librement.

Le moulinet rotatif ne doit pas être utilisé lorsque la hauteur d'eau, au niveau de la verticale, est inférieure à quatre fois le diamètre de l'hélice utilisée ou du corps du moulinet lui-même, si celui-ci est plus grand. L'hélice doit être choisie en fonction de l'intervalle de vitesses de l'écoulement à mesurer. Elle doit toujours être utilisée avec le moulinet qui a servi à établir l'équation de conversion du nombre de tours par unité de temps en vitesse. Les erreurs de mesure à la vitesse minimale de réponse du moulinet sont élevées. Il est donc souhaitable que

l'appareil soit utilisé *in situ* pour des vitesses supérieures à deux fois sa vitesse minimale de réponse.

La position de l'axe du rotor doit être parallèle au sens de l'écoulement et au niveau par rapport à la surface de l'eau. Si un écoulement oblique est inévitable, l'angle de l'écoulement avec la perpendiculaire à la section droite doit être mesuré et la vitesse doit être corrigée (voir section 7.7). De plus, certains fabricants proposent des hélices autocomposantes qui tiennent compte, dans les lectures de vitesse, de l'angle d'incidence de ces courants jusqu'à une certaine limite propre à l'hélice.

Les recommandations du fabricant concernant la pression hydrostatique maximale à laquelle l'instrument peut être soumis ainsi que les limites de température applicables à l'utilisation du moulinet doivent être respectées.

En règle générale, le moulinet peut être utilisé pour des vitesses s'étendant de 0,5 à 5 m/s. Cependant, certains équipements peuvent permettre la prise de mesures précises à d'autres vitesses. L'utilisateur doit se référer au certificat d'étalonnage de l'instrument.

7.1.2 Moulinet électromagnétique (aussi nommé courantomètre électromagnétique)

Description

Comme le moulinet rotatif, cet instrument peut être employé pour mesurer la vitesse de l'eau en exploration point par point à l'aide d'une perche. Cet appareil est muni d'un capteur (sonde) électromagnétique fixé sur une perche (Figure 84). Afin de procéder aux mesures, l'utilisateur immerge et déploie le capteur à pied dans le cours d'eau ou depuis un pont. Le capteur utilisé est le même pour tout l'intervalle de vitesses, qui est variable selon le fabricant.

Contrairement au moulinet rotatif, le moulinet électromagnétique est moins sensible aux matières en suspension ou aux débris puisque son corps ne comporte aucune pièce mobile. Il est donc plus durable et facile d'entretien. Il convient mieux que le moulinet rotatif aux écoulements à faible vitesse puisque son utilisation demeure théoriquement possible à des vitesses inférieures à 5 cm/s (0,05 m/s).



Figure 84 : Moulinet électromagnétique (OTT MF pro)

Fournie par : OTT Hydromet, Allemagne

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du moulinet électromagnétique est basé sur la loi de Faraday : l'eau, en se déplaçant dans le champ magnétique généré par l'appareil, induit une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de l'écoulement.

L'obtention de la mesure du débit s'effectue de la même manière que pour le moulinet rotatif.

Le moulinet électromagnétique fournit une indication directe de la vitesse de l'écoulement dans un intervalle de mesure des vitesses pouvant s'étendre de 0 à 6 m/s en fonction des modèles.

Conditions d'utilisation

Le moulinet électromagnétique ne doit pas être utilisé lorsque la hauteur d'eau au niveau du point de mesure est inférieure à trois fois la dimension verticale du capteur. L'axe de la sonde de détection doit être parallèle au sens de l'écoulement et au niveau par rapport à la surface.

On doit s'assurer du bon fonctionnement de la sonde de détection avant de l'utiliser. Les recommandations d'utilisation du fabricant doivent être appliquées. Par exemple, on peut contrôler et régler le zéro de certains appareils en les positionnant de façon immobile dans un contenant non métallique rempli d'eau. Pour certains modèles, l'étalonnage n'est pas requis puisque le zéro se fera automatiquement lorsque le capteur sera sorti de l'eau et se retrouvera dans l'air.

Cet appareil est sensible à la température et il doit être immergé quelques minutes avant le début de l'essai. De plus, il ne doit pas être utilisé à proximité de substances ferreuses (ex. : armature de béton), qui perturbent l'appareil.

L'affichage numérique permet d'obtenir une lecture directe de la vitesse de l'écoulement.

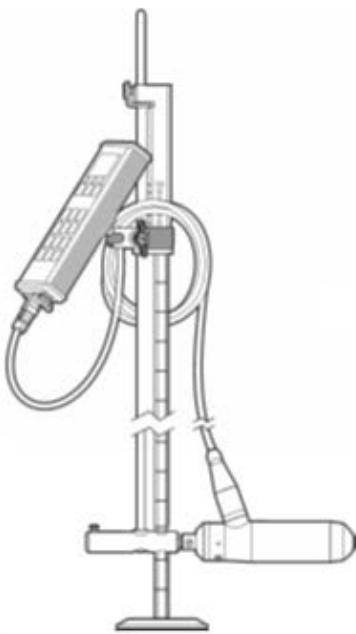
7.1.3 Vélocimètre acoustique Doppler (aussi nommé courantomètre acoustique)

Description

Le vélocimètre acoustique Doppler est un système de mesure ponctuelle utilisé pour étudier les fluctuations de la vitesse de l'eau à l'aide de signaux acoustiques. Par rapport aux moulinets rotatif et électromagnétique, ce type d'appareil offre l'avantage de permettre le calcul du débit dès la fin de l'exploration des vitesses de la section de mesurage.

L'appareil est constitué d'un capteur et d'un terminal mobile (voir Figure 85 A). Le capteur est fixé sur une perche et déployé à pied dans un cours d'eau, depuis un pont ou une passerelle. L'appareil ne comporte aucune pièce mobile. Certains modèles sont équipés d'un capteur de pression permettant les mesures de hauteur d'eau et de profondeur d'immersion. De plus, il est parfois possible qu'un calcul d'incertitude soit associé au résultat final.

La Figure 85 A et B présente des exemples de vélocimètres acoustiques Doppler.



A - Acoustic Digital Current meter (ADC)

Fournie par : OTT Hydromet, Allemagne



B - FlowTracker® de SonTek®

Fournie par : SonTek, États-Unis

Figure 85 : Exemples de vélocimètres acoustiques Doppler

Comme l'illustre la Figure 86, le capteur peut être constitué d'un transducteur central responsable de l'émission de l'impulsion acoustique concentrée dans un faisceau étroit de quelques millimètres (variable selon les modèles). Les récepteurs acoustiques sont montés sur les extensions du capteur et convergent vers une zone d'échantillonnage commune située à une distance fixe du capteur (environ 10 cm). La zone d'échantillonnage est l'emplacement physique de la mesure de la vitesse de l'eau et elle fournit un ensemble de données spatiales et temporelles dont l'analyse permet de visualiser le profil de l'écoulement.

En fonction des modèles, l'appareil peut être muni de deux ou trois récepteurs acoustiques (capteurs 2D ou 3D) (voir Figure 85 B).

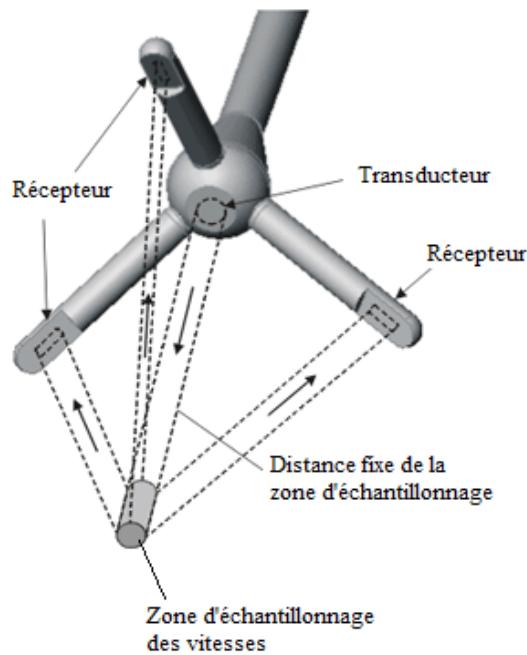


Figure 86 : Composantes d'un vélocimètre acoustique Doppler 3D (FlowTracker® de SonTek) et illustration du déplacement de l'ultrason entre le transducteur et les récepteurs
Fournie par : SonTek, États-Unis

Selon les modèles, le fonctionnement des capteurs peut aussi présenter des différences, comme le démontre la Figure 87.

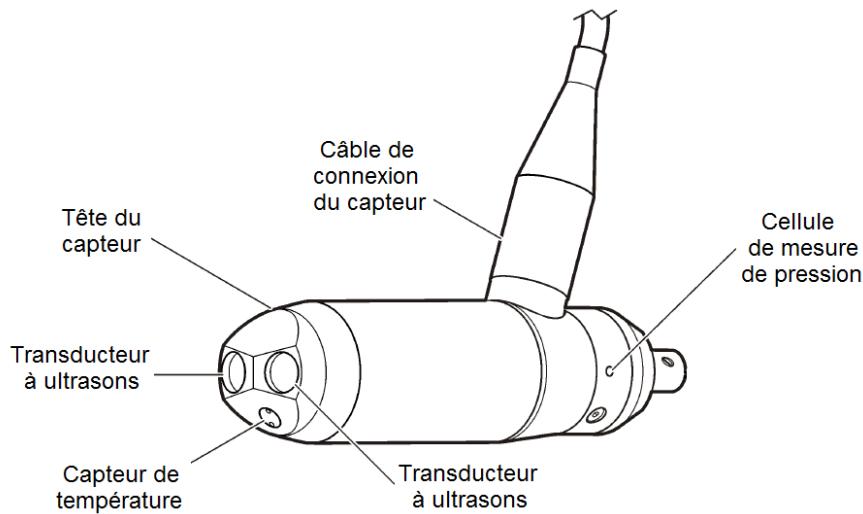


Figure 87 : Composantes du capteur de l'appareil ADC de OTT
Fournie par : OTT Hydromet, Allemagne (adaptation française)

Les éléments nécessaires au mesurage de la vitesse, de la profondeur et de la température de l'eau peuvent aussi être intégrés dans le capteur.

Principe de fonctionnement

Le vélocimètre acoustique fonctionne selon le principe de l'effet Doppler. Le transducteur de l'appareil envoie une courte impulsion acoustique qui se déplace le long de l'axe du faisceau du transducteur. L'ultrason émis est réfléchi dans toutes les directions par les particules en suspension (ex. : sédiments, petits organismes, bulles d'air) présentes dans l'eau de la zone d'échantillonnage. Une partie de l'énergie réfléchie se déplace le long des axes des faisceaux des récepteurs acoustiques pour y être enregistrée. Ces récepteurs mesurent la fréquence de l'onde réfléchie et la convertissent en vitesse d'écoulement.

L'intervalle de mesure des vitesses est variable selon les marques et les modèles d'appareils. À titre informatif, il est possible de voir des valeurs s'étendant jusqu'à 4 m/s.

L'échantillonnage de la vitesse est effectué par une succession de mesures individuelles (« *ping* ») de la vitesse (2D ou 3D). Ces vitesses sont enregistrées par l'appareil, qui effectue aussi la moyenne des vitesses et enregistre les données de contrôle de qualité.

Afin d'obtenir le débit de l'écoulement, on utilise l'appareil selon le procédé classique par verticale avec des perches de moulinet traditionnel (ISO 748). Au cours d'une mesure du débit, il mesure aussi bien la répartition de la vitesse sur la verticale que la profondeur de l'eau et chaque profondeur d'immersion du capteur. À partir des valeurs mesurées et des caractéristiques de la section de mesurage inscrites dans l'appareil par l'utilisateur, il calcule la vitesse moyenne et le débit sur la verticale. Par calcul, il est par la suite possible d'obtenir le débit de l'écoulement de la section de mesurage au cours de l'essai.

Conditions d'utilisation

L'appareil ne mesure pas directement le mouvement de l'eau, mais le mouvement des particules dans l'eau, d'où l'importance que le mouvement des particules soit représentatif du mouvement de l'eau.

Avant d'entreprendre le mesurage, l'utilisateur indique sur le terminal mobile les paramètres de la station de mesure ainsi que les méthodes de mesure et de calcul désirées. Le montage du capteur sur la perche doit être effectué selon les recommandations du fabricant et la perche doit être maintenue verticalement lors de l'essai. L'appareil est étalonné avec un montage donné et doit donc être utilisé avec ce montage. De plus, puisque des données d'étalonnage des capteurs peuvent être intégrées au terminal mobile, certains fabricants peuvent demander que le capteur et le terminal soient utilisés ensemble.

Il est requis de vérifier régulièrement la propreté des transducteurs d'ultrasons pour éviter la présence de sable ou la croissance d'algues qui pourraient entraîner une diminution de la puissance du signal acoustique.

Cet appareil est très sensible aux variations de densité et de température. Un changement de température de 5 °C engendre une variation de la vitesse du son d'environ 1 %, ce qui entraîne

une erreur d'environ 2 % dans les mesures de vitesse. Un capteur de température permettant d'effectuer des corrections automatiques de la vitesse du son est habituellement intégré dans l'appareil. La compensation de température du capteur s'effectue dans des conditions extrêmes (d'environ 50 °C à 5 °C) en 5 à 6 minutes. Il est donc recommandé de laisser le capteur immergé pendant environ 5 minutes avant de commencer l'essai.

Généralement, la hauteur d'eau doit correspondre minimalement à trois fois la dimension verticale du capteur, à moins d'indications contraires du fabricant. Le capteur devrait être orienté de sorte qu'il soit positionné contre le courant et à angle droit par rapport à la section de mesurage.

L'utilisation de cet appareil n'est pas recommandée pour une eau comportant très peu ou pas de particules en suspension. Cette exigence est rarement contraignante puisque les quantités de particules dans les cours d'eau naturels ou dans les effluents industriels ou municipaux sont habituellement suffisantes pour qu'on puisse utiliser cette méthode, et la technologie actuelle est telle que même une petite quantité de particules dans l'eau est généralement suffisante pour de bonnes mesures.

Aucun obstacle ne doit se trouver à proximité immédiate du capteur. De plus, l'emplacement de la zone d'échantillonnage devrait être situé à l'écart de structures ou d'obstacles pour que toute interférence soit évitée.

Idéalement, la mesure est effectuée depuis un pont ou une passerelle de mesure. Si la mesure a lieu directement dans l'eau, l'utilisateur doit se tenir à une distance suffisante, à côté du dispositif de mesure, afin de ne pas influencer l'écoulement.

7.1.4 Débitmètre hauteur – vitesse Doppler et profileur de courant (ADCP)

Description

Contrairement aux équipements préalablement décrits qui effectuent la mesure de vitesse de façon ponctuelle sur des verticales réparties sur la section transversale du canal, le débitmètre hauteur – vitesse Doppler permet une mesure de la vitesse moyenne dans un faisceau acoustique. Un profileur de courant ADCP (*acoustic Doppler current profiler*) mesure, pour sa part, les vitesses de façon multi-point par le biais de cellules réparties le long d'un axe et constitue une autre variante d'appareil fonctionnant selon l'effet Doppler.

Profileur de courant ADCP

Il comporte habituellement trois ou quatre transducteurs (éléments en céramiques émettrices/réceptrices), émettant des faisceaux acoustiques divergents autour de la verticale, ce qui permet de mesurer le profil vertical des vitesses en 3D (Figure 88). Le signal ultrasonique est émis dans l'eau par un élément en céramique, puis rétrodiffusé par les particules en suspension (dont la vitesse est censée être la même que celle de l'écoulement) et enfin reçu par le même élément en céramique. Ce mode de fonctionnement implique un décalage dans l'acquisition des données, car l'émission et la réception se font sur le même élément de céramique piézoélectrique.

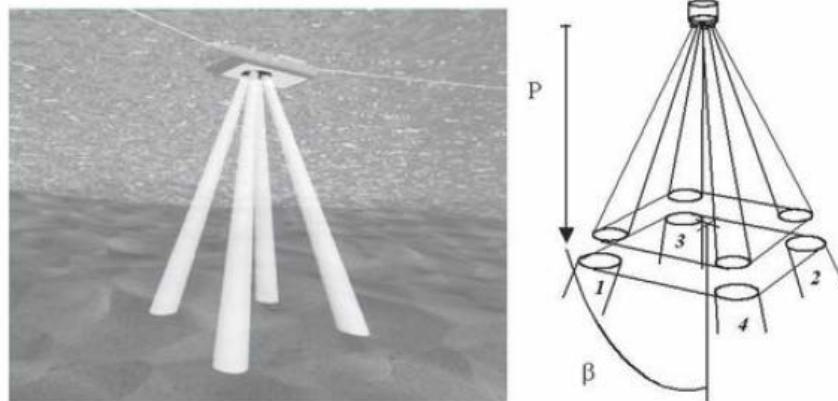


Figure 88 : Exemple de profileur de courant (ADCP monostatique à quatre faisceaux)
Fournie par : Éditions Quae, France, Mesures hydrologiques par profileur Doppler, Le Coz, 2008, figure 1.6

En fonction des modèles, l'ADCP peut s'utiliser en déploiement stationnaire s'apparentant par exemple à l'utilisation d'un courantomètre, mais il offre la possibilité d'une utilisation mobile sur un équipement de flottaison permettant d'effectuer des traversées et ainsi de déterminer le débit d'un cours d'eau. La gamme de mesure des vitesses pour ce type d'appareil se situe à ± 5 à 20 m/s.

Étant donnée l'application plus fréquente de ce type d'appareil en milieu naturel ou en océanographie, le profileur de courant ADCP ne sera pas davantage détaillé dans le présent document.

Débitmètre hauteur – vitesse Doppler

En fonction des particularités de l'appareil sélectionné, la technologie Doppler peut s'appliquer aux mesures de débit en conduites découvertes ou fermées, de petite ou moyenne taille. Les appareils de ce type sont habituellement composés d'une unité centrale, d'un capteur de vitesse et d'un capteur de niveau d'eau. La mesure de la vitesse s'effectue par le capteur à effet Doppler, alors que selon les modèles, la mesure de hauteur s'effectue par une sonde à ultrasons ou par un capteur piézorésistif (mesure de pression) intégré à l'appareil ou externe.

L'intervalle de mesure des vitesses est variable selon les fabricants, mais il est possible de voir des vitesses bidirectionnelles s'étendant de 0,01 à 6 m/s.

Selon les modèles, ces appareils immergés sont fixés en fond de canal, montés latéralement sur un des côtés du canal ou encore montés sur un support flottant (Figure 89). La forme et le matériau composant le capteur réduisent au minimum la résistance à l'eau pour influencer le moins possible le profil d'écoulement.

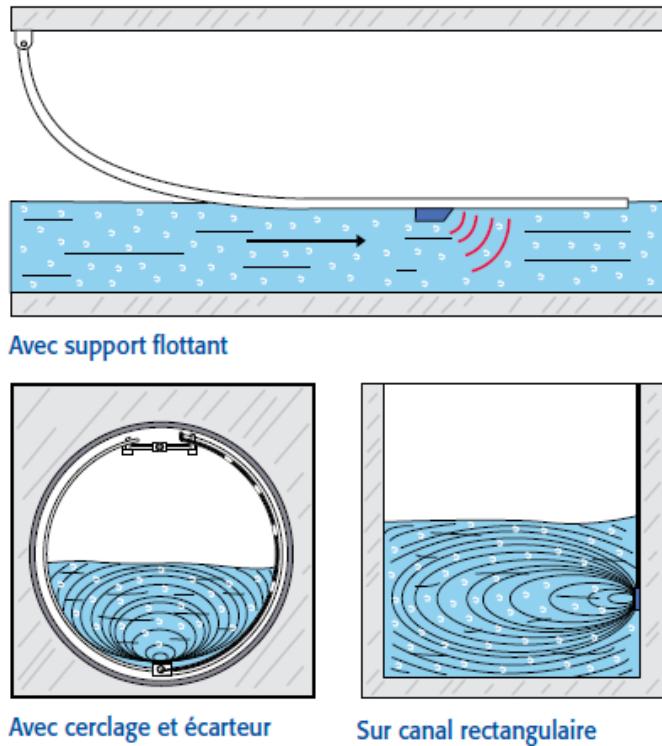


Figure 89 : Exemples de montage de capteurs (MainFlo de Hydreka)

Fournie par : Scadalliance Corporation

Le débitmètre hauteur – vitesse Doppler permet de mesurer la vitesse moyenne réelle de l’écoulement traversant les faisceaux acoustiques (habituellement au nombre de deux). Le débit est par la suite calculé à partir de la vitesse moyenne, de la hauteur d’eau et de l’aire de la section mouillée.

En raison de certaines limitations techniques, les débits doivent parfois être extrapolés dans certaines zones aveugles qui restent inexplorées à proximité de l’appareil ou dans certaines zones du fond ou de la surface selon le cas. Un deuxième capteur peut être nécessaire pour limiter les zones aveugles attribuables à la dimension importante du canal.

L’affichage des données en temps réel permet de visualiser la vitesse instantanée de l’écoulement ainsi que la totalisation du volume d’eau. La visualisation, le traitement des données et le pilotage de l’appareil se font à l’aide d’un logiciel fourni par le fabricant. Il est aussi possible d’utiliser un programme maison pour traiter les données, mais les zones aveugles doivent être considérées et les valeurs extrapolées doivent être représentatives des conditions d’écoulement.

Principe de fonctionnement

Le capteur immergé dans l’écoulement envoie un signal acoustique continu qui prend la forme d’un faisceau acoustique émis obliquement selon un certain angle (ex. : 20°, 45°, etc.), suivant l’axe de l’écoulement (Figure 90).

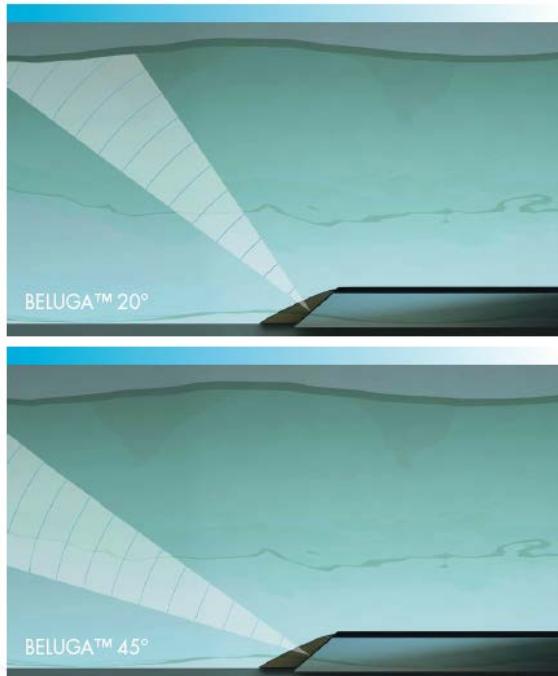


Figure 90 : Exemples d'angles du faisceau (Beluga de Flow-Tronic)

Fournie par : Flow-Tronic, Belgique

Le récepteur situé dans le même boîtier traite les ondes réfléchies par les particules en suspension dans l'écoulement. L'analyse de ces ondes par l'appareil permet de mesurer la vitesse de l'écoulement pour ensuite la convertir en vitesse moyenne. Simultanément, la hauteur d'eau est mesurée en continu par un capteur immergé intégré à l'appareil (ex. : capteur de pression ou capteur ultrasonique émettant un faisceau vertical) ou externe (ex. : capteur de hauteur ultrasonique sans contact ou radar). L'emplacement de la mesure de la hauteur d'eau doit être représentatif des conditions d'écoulement présentes à la section de mesure des vitesses.

La hauteur d'eau et les dimensions du canal ou le diamètre de la conduite sont convertis en aire mouillée. La multiplication de l'aire de la section mouillée par la vitesse moyenne mesurée par l'appareil permet d'obtenir le débit.

Conditions d'utilisation

Chaque modèle présente ses caractéristiques spécifiques et ses avantages et inconvénients en fonction des particularités du site (ex. : emplacement, largeur et profondeur d'eau de la section de mesure, zone morte).

La partie de la section transversale échantillonnée dépend des dimensions du canal, de la position de l'instrument et des caractéristiques de conception du capteur. Comme dans le cas des équipements procédant à l'exploration du champ des vitesses selon un déploiement par verticale, les débitmètres hauteur – vitesse Doppler n'échantillonnent pas totalement les vitesses de la section de mesure. La vitesse globale est donc obtenue à partir d'une vitesse partielle, particulièrement lorsque le canal présente des dimensions importantes.

Le choix de l'emplacement doit être le plus représentatif possible des vitesses moyennes dans le canal, et les éléments suivants sont à considérer :

- Privilégier un écoulement peu turbulent où les vitesses sont uniformément réparties dans le canal;
- Éviter la présence de chutes ou de changements de direction immédiatement en amont de l'emplacement de montage du capteur (pente < 3 %);
- Sélectionner une section de mesurage libre d'obstruction (ex. : arbres, croissance aquatique, dégrilleur ou autres obstacles);
- Éviter d'installer l'équipement dans une zone propice à l'accumulation de sédiments et s'assurer que le capteur demeure libre de limon et d'algues;
- S'assurer que l'écoulement comporte une densité adéquate de réflecteurs (ex. : matières en suspension et bulles d'air) et une homogénéité dans leur distribution;
- Installer le capteur de manière à ce que l'angle du faisceau ultrasonique soit au-dessous de la surface du liquide et de telle sorte que le cône du faisceau atteigne une zone d'échantillonnage aussi représentative que possible.

Une sélection minutieuse de l'équipement et un montage en respect avec les spécifications techniques du fabricant favorisent de meilleures performances et réduisent l'entretien. Il est donc essentiel de :

- Sélectionner un appareil apte à procéder aux mesures selon les conditions de l'installation (ex. : conduite découverte, conduite partiellement pleine, conduite fermée en charge, dimension du canal ou diamètre de la conduite);
- Procéder à un montage adapté au type d'appareil et aux conditions d'écoulement (ex. : le montage en fond de canal favorise l'accumulation de débris, en contrepartie la distribution du faisceau d'un montage latéral peut impliquer que des données soient perdues);
- Respecter la hauteur d'eau minimale requise par le fabricant pour l'utilisation de l'appareil;
- Sélectionner un appareil dont l'intervalle de mesure correspond à celle *in situ*;
- S'assurer de l'intégrité de l'appareil et de la propreté du capteur;
- Veiller à ce que la température de l'écoulement soit comprise dans l'intervalle de mesure des températures admissibles par l'appareil. Si requis, prévoir une période de mise en température de l'appareil;
- Sélectionner un appareil permettant une évaluation de la qualité du signal Doppler et donc la validation de l'exactitude de la mesure de vitesse (capteur numérique « intelligent »). Par exemple, certains appareils peuvent utiliser cette information pour modifier temporairement la méthode de calcul du débit (ex. : passage en loi hauteur – débit);
- Sélectionner un capteur de hauteur approprié aux conditions *in situ*. Par exemple :
 - Un capteur de pression représente souvent l'option la plus économique, par contre son installation immergée dans l'écoulement peut favoriser l'accumulation de débris et impliquer plus d'entretien;

- Un capteur ultrasonique sans contact est simple d'installation et d'entretien, mais est influencé par la condensation ainsi que par la présence de mousse ou d'objets flottant à la surface de l'écoulement. De plus, une zone aveugle de 20 à 30 cm est normalement à prévoir entre le capteur et le début de la mesure;
- Un capteur radar sans contact est souvent plus dispendieux, mais nécessite peu d'entretien, il n'est pas sensible aux objets flottants ou à la vapeur et la mesure n'est pas contrainte par une zone aveugle aussi importante.

Le traitement des données permettant d'établir le débit de l'écoulement se fait généralement par le programme fourni par le fabricant de l'appareil ou par un programme maison. Pour que la validité des mesures soit assurée, les éléments suivants doivent être respectés :

- Incrire avec précision les dimensions de la section de mesurage;
- Considérer toute irrégularité nécessitant par exemple l'inscription de la largeur de la section de mesurage à plusieurs niveaux d'eau;
- Réduire au minimum les zones aveugles où le débit devra être extrapolé (l'extrapolation des mesures dans les zones aveugles doit représenter au plus 30 % du débit total);
- Synchroniser les appareils (ex. : heure, fréquence de mesure, délai de transmission, etc.);
- Sélectionner une fréquence de mesure permettant d'obtenir des données représentatives des conditions d'écoulement (ex. : en cours d'essai, prévoir la mesure en continu, constituée minimalement d'une donnée toutes les 30 secondes, pendant une période de 30 minutes).

7.1.5 Débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar

Description

Le débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar effectue la mesure de la vitesse à la surface de l'écoulement, sans contact direct entre la sonde et l'écoulement (Figure 91). La mesure de vitesse est combinée avec une mesure de hauteur d'eau qui peut aussi s'effectuer de façon aérienne (capteur de niveau, ultrasonique ou radar) ou encore immergée (capteur de pression hydrostatique).

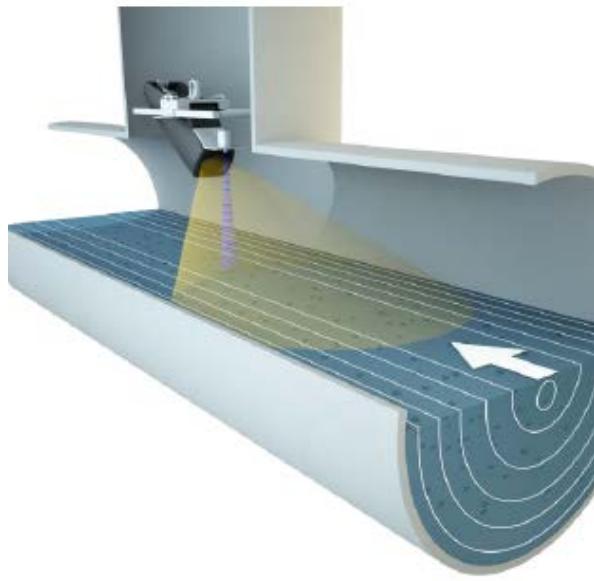


Figure 91 : Installation comportant un débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar (RAVEN-EYE de Flow-Tronic)

Fournie par : Flow-Tronic, Belgique

Le débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar se positionne au-dessus de la surface du liquide à mesurer et s'adapte à différents types d'installations en écoulement libre allant d'une conduite dans un regard à un pont surplombant un cours d'eau. Ce type d'appareil peut offrir une solution de mesure de débit dans le cas de conditions d'écoulement difficiles, comme en présence d'un taux important de matières en suspension, de hautes températures, de vapeur, de fluides corrosifs, etc.

Cet appareil est disponible en version fixe pour une installation permanente ou portable, utile par exemple pour la vérification d'un système de mesure de débit.

En fonction des modèles, ce type d'appareil offre un intervalle de mesure des vitesses s'étendant de 0,10 à 15 m/s, bidirectionnelle.

Principe de fonctionnement

La mesure de la vitesse s'effectue par le faisceau radar Doppler pulsé. L'onde radar transmise sur la surface liquide est partiellement réfléchie et produit un signal de fréquence différente, ce qui permet de déterminer la vitesse de l'écoulement (Figure 92).

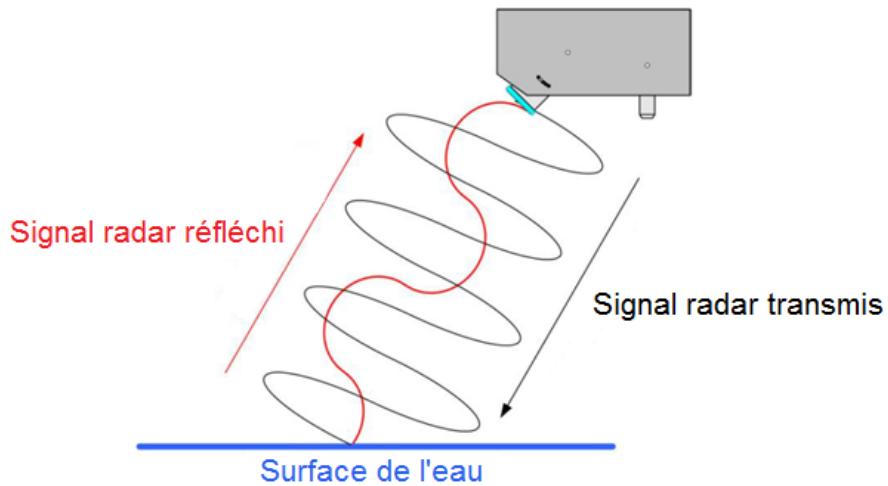


Figure 92 : Mesure de vitesse par le faisceau radar (RQ-30 de Sommer)

Fournie par : Sommer, Autriche (adaptation française)

La surface mesurée dépend de la distance entre la sonde et la surface de l'écoulement à mesurer et de l'angle (Figure 93). Plus la distance entre la sonde et la surface de l'écoulement est restreinte, plus la surface mesurée est petite.

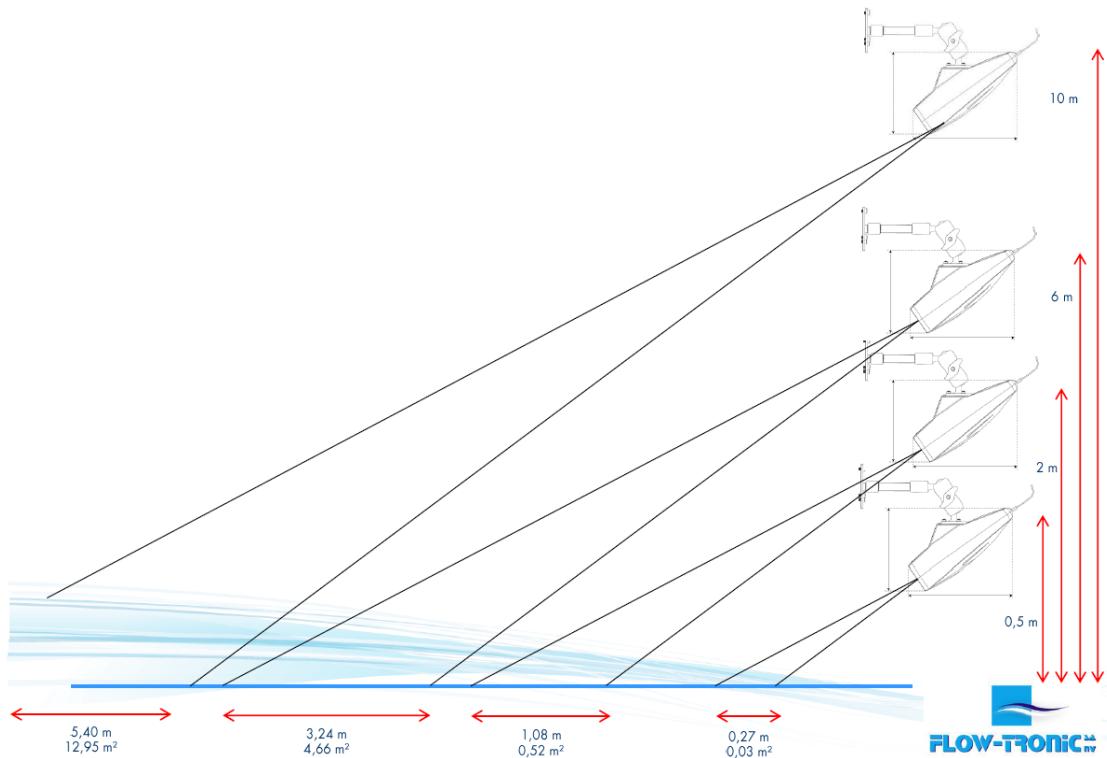


Figure 93 : Incidence de la distance de la sonde sur la surface mesurée, pour un angle de $\pm 10^\circ$ (RAVEN-EYE de Flow-Tronic)

Fournie par : Flow-Tronic, Belgique

Simultanément, la hauteur d'eau est mesurée par une sonde de niveau qui peut être sans contact (ex. : ultrasons pulsés, radar) ou immergée (ex. : pression hydrostatique). Dans le cas d'un dispositif radar (Figure 94), de courtes impulsions sont envoyées perpendiculairement par rapport à la surface de l'eau. Le temps entre l'émission et la réception de ces impulsions est mesuré pour déterminer la distance par rapport à la surface de l'eau, et donc le niveau de l'eau.

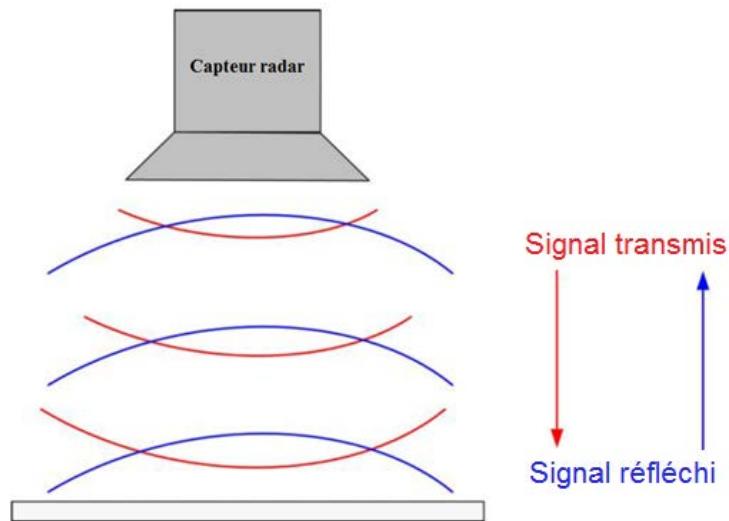


Figure 94 : Mesure de hauteur d'eau par un faisceau radar (RQ-30 de Sommer)

Fournie par : Sommer, Autriche (adaptation française)

L'appareil convertit la mesure de la vitesse de la surface de l'écoulement en vitesse moyenne à partir d'algorithmes; l'exactitude de l'instrument dépend en grande partie de la performance de ces algorithmes, selon les méthodes propres à chaque fabricant. En fonction de la forme du canal, il convertit la hauteur d'eau en section mouillée. Le débit est obtenu par multiplication de la vitesse moyenne calculée et de l'aire de la section mouillée.

Conditions d'utilisation

Cet appareil offre la possibilité de s'adapter à plusieurs tailles (à partir de 100 mm de largeur) et formes de canaux ou de conduites ainsi qu'aux écoulements présentant des vitesses élevées, sans être influencé par un écoulement présentant des turbulences.

Puisque la mesure de vitesse s'effectue sans contact avec l'écoulement, il offre l'avantage d'effectuer des mesures dans une grande variété d'effluents, sans être affecté par les liquides chargés en matières en suspension ou présentant des caractéristiques particulières (ex. : débris flottants, liquides corrosifs, haute température, etc.).

Lors de la mise en place de l'équipement au site de mesure, le profil de la section doit être défini afin que les mesures soient représentatives des conditions réelles. En fonction des modèles, il peut être possible de sélectionner un profil de géométrie préprogrammé ou de saisir plusieurs points géométriques pour créer un profil complexe.

Pour obtenir des valeurs de débit ou de volume d'eau représentatives des conditions d'écoulement, il est requis de faire un essai d'une durée minimale de 30 minutes pendant lequel les mesures s'effectuent en continu (minimalemennt une donnée toutes les 30 secondes).

Comme pour tous les équipements, il est essentiel de suivre les recommandations d'utilisation du fabricant. De façon générale, les éléments suivants devraient minimalemennt être respectés, particulièrement pour la mesure du débit de l'essai dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit :

- L'écoulement devrait être libre, sans vortex, zones mortes, refoulements ou courants préférentiels;
- Les propriétés du lit du canal devraient être stables pour que des mesures cohérentes soient assurées (ex. : éviter la présence de roches);
- Il faut privilégier un écoulement présentant un léger mouvement de surface plutôt que des surfaces d'écoulement très calme qui pourraient réfléchir les faisceaux;
- Des conditions favorables d'écoulement devraient être présentes sur une distance amont répondant aux exigences du fabricant, par exemple une distance amont correspondant à dix fois le diamètre de la conduite (ou largeur du canal) et sur une distance aval correspondant à cinq fois le diamètre de la conduite (ou largeur du canal);
- L'appareil devrait être installé parallèlement à l'écoulement, et centré sur la largeur de la conduite ou du canal;
- La sonde de niveau devrait idéalement être installée au centre de la surface mesurée pour la vitesse;
- La présence d'objets métalliques dans l'eau devrait être évitée puisqu'ils pourraient réfléchir les mesures du radar.

7.2 ENTRETIEN, VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE ET ÉTALONNAGE

L'exactitude d'un système de mesure du débit peut uniquement être assurée lorsque celui-ci est entretenu régulièrement et utilisé et entreposé adéquatement conformément aux recommandations du fabricant.

Les précautions nécessaires doivent être prises avant chaque utilisation pour que l'appareil fonctionne correctement. Les fabricants proposent un certain nombre de contrôles à effectuer périodiquement. Le manuel d'utilisation détaillé provenant du fabricant et comprenant ces informations doit être disponible en tout temps avec l'équipement.

La vérification de l'appareil peut permettre la mise en évidence d'une défaillance du capteur ou de la concordance avec les valeurs considérées comme références. Des vérifications périodiques par des contrôles comparatifs *in situ* avec d'autres instruments de mesure des vitesses sont aussi recommandées.

L'étalonnage est plus encadré que la vérification de l'appareil et permet un réglage de la réponse de l'équipement. Il s'effectue habituellement sur un banc d'essai par un laboratoire accrédité.

Il doit s'accompagner d'un certificat d'étalonnage délivré par un organisme reconnu et certifié, conforme aux normes ISO applicables (ISO 17025).

La vérification ou l'étalonnage de l'appareil ne sera valide que s'il est correctement manipulé et entretenu par du personnel qualifié. L'utilisateur doit suivre minutieusement les procédures de vérification recommandées avant et après chaque essai, comme décrit dans le manuel d'utilisation et d'entretien du fabricant.

Pour plus de précisions concernant l'étalonnage, l'entretien, l'utilisation, le transport et l'entreposage des équipements, consulter la dernière édition des normes, lignes directrices, rapports techniques ou autres documents de référence, notamment :

- ISO 748 – Hydrométrie – Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs;
- ISO 1088 – Hydrométrie – Méthodes d'exploration du champ des vitesses à l'aide de moulinets – Recueil et traitement des données pour la détermination des incertitudes de mesurage du débit;
- ISO 2537 – Mesure de débit des liquides dans des canaux découverts – Moulinets à élément rotatif;
- ISO 3455 – Hydrométrie – Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes;
- ISO 15769 – Hydrométrie – Lignes directrices pour l'application des compteurs de vitesse ultrasonique utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos;
- ISO 24578 – Hydrométrie – Profils Doppler acoustiques – Méthode et application pour le mesurage du débit en conduites ouvertes.

Moulinet rotatif

Il est recommandé d'effectuer un contrôle visuel de l'état des hélices avant chaque jaugeage et de tenir une fiche de suivi des opérations de changement d'huile et de contrôle des composantes de l'appareil. Cette fiche de suivi devrait être conservée et être mise à jour à chaque intervention.

Le moulinet doit être nettoyé après chaque jour d'utilisation ou après chaque mesure du débit dans une eau fortement chargée de sédiments.

Sous réserve d'une exigence plus sévère, l'étalonnage du moulinet devrait être effectué au moins tous les ans ou après 300 heures d'utilisation (selon la plus faible des deux périodes), de même que chaque fois qu'un dérèglement est soupçonné. Le moulinet doit être utilisé strictement à l'intérieur de sa plage d'étalonnage. Il est aussi souhaitable qu'il soit installé sur un équipement de suspension semblable à celui qui a servi à son étalonnage.

L'étalonnage du moulinet doit être réalisé conformément à la norme ISO 3455. Il consiste à établir, par expérimentation, une relation entre le nombre de révolutions par unité de

temps effectuées par le rotor à une vitesse connue. L'information est reportée sur un graphique (courbe d'étalonnage) ou un tableau, accompagnée de l'équation d'étalonnage. Minimalement, les informations suivantes devraient accompagner l'appareil lors de son emploi *in situ* ou être à tout le moins facilement accessibles : la date de l'étalonnage, l'identification de l'hélice, le nom de l'organisme ayant procédé à l'étalonnage, l'équation d'étalonnage et l'équipement de suspension utilisé.

Moulinet électromagnétique

Il est important d'assurer la propreté des électrodes puisque la formation d'un film sur le capteur peut compromettre les mesures. L'utilisateur doit consulter le manuel d'instruction fourni par le fabricant afin d'appliquer les recommandations d'entretien et de vérification de ce type d'appareil.

La norme ISO 3455 indique que la mesure du zéro dans une eau stagnante doit être effectuée régulièrement et que ces éléments doivent être notés dans un registre. Une modification brusque ou une dérive constante indique qu'un réétalonnage est requis.

L'ajustage du zéro est possible et consiste à immerger la sonde dans l'eau, par exemple dans un contenant dont la dimension permet l'éloignement de la sonde de 7 à 8 cm par rapport aux parois. Le réglage peut être effectué lorsqu'il n'y a plus aucun mouvement dans l'eau.

Pour sa part, l'étalonnage est requis tous les ans ou à une fréquence plus courte lorsqu'un dérèglement est soupçonné. Il s'effectue sur le capteur qui mesure l'intensité du champ magnétique en fonction de la vitesse d'écoulement de l'eau. Le moulinet électromagnétique peut être étalonné dans les mêmes conditions que le moulinet rotatif, à partir d'un mesurage sur chariot mobile dans un bassin d'eau calme (ISO 3455).

Vélocimètre acoustique Doppler

Généralement, les recommandations de base du fabricant en ce qui concerne les exigences d'entretien de l'appareil comprennent le nettoyage des transducteurs et autres composantes (écran LCD, port USB, connecteur, etc.), ainsi que l'inspection des câbles et des connecteurs.

Bien que certains fabricants indiquent que le réétalonnage périodique n'est pas requis, l'exactitude de la mesure doit être validée périodiquement afin que cet équipement soit utilisé pour les besoins de la présente méthode et dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit.

Ainsi, si l'étalonnage annuel sur chariot mobile en bassin rectiligne n'est pas possible, une vérification annuelle par des essais comparatifs sur un banc d'essai est requise. Le banc d'essai doit comporter un étalon retracable et certifié, c'est-à-dire un étalon lié à une référence nationale ou internationale (ISO 17025, Bureau de normalisation du Québec [BNQ], etc.). Le détail de la vérification ainsi que le résultat de cette vérification doivent apparaître dans une attestation de conformité.

Débitmètre hauteur – vitesse Doppler

De façon générale, les éléments suivants devraient faire partie des vérifications de routine lors de l'utilisation de ce type d'appareil : la vérification du niveau de la pile, du fonctionnement de toutes les composantes du système (y compris l'alimentation électrique et le câblage), de l'étanchéité des joints sur l'instrument ainsi que le nettoyage des composants du système (capteurs de vitesse et de hauteur d'eau). Ces précautions permettent d'éviter l'accumulation de dépôts ou de limon sur l'appareil.

L'exactitude des données fournies par l'appareil est directement reliée à la conformité de l'installation. L'utilisateur doit aussi s'assurer que le capteur est fixé solidement (par rapport au fond ou en bordure de canal selon le cas) et aligné par rapport à l'écoulement, que le faisceau de l'appareil est libre d'obstruction (ex. : débris, herbes, algues, etc.), que les appareils sont synchronisés et que les mises à jour et maintenances du logiciel d'acquisition et du micrologiciel (« *firmware* ») sur le capteur sont effectuées.

Ce type d'appareil ne comporte aucune pièce mobile et selon les fabricants, le réétalonnage systématique n'est pas requis puisque la réponse de l'appareil ne change pas sauf si un bris ou une modification physique de l'équipement survient. Pour assurer la validité du modèle de calcul intégré à l'appareil, il est toutefois recommandé de procéder annuellement à sa vérification par des essais comparatifs sur banc d'essai, particulièrement lorsque l'appareil est utilisé pour les besoins de la présente méthode et dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit. Le banc d'essai doit comporter un étalon retraçable et certifié, c'est-à-dire un étalon lié à une référence nationale ou internationale (ISO 17025, BNQ, etc.). Le détail de la vérification ainsi que le résultat de cette vérification doivent apparaître dans une attestation de conformité.

Débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar

Ce type d'appareil est généralement conçu de façon étanche et sans joints, ce qui favorise sa résistance aux intempéries. Son installation au-dessus de la surface de l'eau élimine les problématiques d'encrassement ainsi que l'entretien requis comme pour les capteurs immersés.

Puisque le débit est obtenu par un calcul impliquant le profil géométrique de la section mouillée, il est requis d'assurer la validité de ce profil à travers le temps, particulièrement dans des conditions naturelles où la bathymétrie du site peut s'être modifiée.

De plus, la conformité de la mesure de l'appareil doit être validée par des essais comparatifs sur banc d'essai lorsqu'il est utilisé pour les besoins de la présente méthode et dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit. Le banc d'essai doit comporter un étalon retraçable et certifié, c'est-à-dire un étalon lié à une référence nationale ou internationale (ISO 17025, BNQ, etc.). Le détail de la vérification ainsi que le résultat de cette vérification doivent apparaître dans une attestation de conformité.

7.3 DÉTERMINATION DE L’EMPLACEMENT DE LA SECTION DE MESURAGE

Le choix de l'emplacement de la section de mesurage des vitesses doit tenir compte des conditions d'utilisation applicables pour chaque appareil et des éléments généraux suivants, particulièrement pour la mesure du débit de l'essai dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit :

- L'emplacement doit être facilement accessible;
- L'amont de la section de mesurage doit être droit, exempt d'affluents, d'obstacles ou de tout autre élément pouvant perturber l'écoulement, et ce, pour favoriser un écoulement lamininaire. La longueur droite et sans perturbation de la section de mesurage doit correspondre à au moins dix fois sa largeur à l'amont et à cinq fois sa largeur à l'aval, ou selon les recommandations applicables à l'appareil;
- L'emplacement doit être de forme régulière, de pente uniforme et exempt de dépôts sur ses parois;
- Il ne doit pas comporter d'écoulements divergents, convergents ou présentant des courants de retour, des courants nuls ou des vortex;
- La hauteur d'eau doit être suffisante pour assurer l'immersion de l'appareil de mesure et le respect des conditions d'utilisation de l'appareil utilisé;
- La vitesse de l'écoulement doit respecter les vitesses minimale et maximale recommandées pour l'utilisation de l'appareil.

Les choix disponibles pour la section de mesurage peuvent être limités. Il est dans ce cas nécessaire de sélectionner une méthode de mesure du débit ou un type d'équipement capable de s'adapter le mieux possible aux conditions *in situ*.

7.4 MESURAGE DE L’AIRE DE LA SECTION MOUILLÉE

L'aire de la section mouillée doit être déterminée au niveau de la section de mesurage (largeur et hauteur d'eau).

Pour vérifier la variation de la hauteur d'eau au cours de la période de mesurage, il est recommandé d'installer un équipement de mesure de la hauteur d'eau à enregistrement en continu (ex. : limnigraphie, débitmètre bulle à bulle, débitmètre à sonde submergée) et de fournir les hauteurs minimale et maximale mesurées au cours de l'essai.

Lorsque la méthode d'exploration du champ des vitesses est appliquée selon le principe de mesurage par verticale (moulinet rotatif, moulinet électromagnétique et velocimètre acoustique Doppler), les mesurages des hauteurs d'eau dans une section comportant un fond irrégulier doivent être effectués à des intervalles suffisamment rapprochés pour définir avec précision le profil de la section.

Minimamente, le nombre de points de mesure de la hauteur d'eau correspond au nombre de points de mesure de la vitesse, et ces mesurages sont généralement faits simultanément. La mesure en continu de la hauteur d'eau, effectuée à un seul point sur l'axe transversal de la

section de mesurage (ex. : limnigraphie, débitmètre bulle à bulle, sonde ultrasonique), est acceptable pour des canaux dont le fond est régulier.

Dans ces cas, l'écart entre la hauteur d'eau la plus faible et la plus élevée, par rapport à la hauteur d'eau la plus élevée, pour toute la durée de l'essai, doit être inférieur à 5 %. Dans le cas contraire, des actions doivent être entreprises pour stabiliser le débit, ou des correctifs doivent être apportés au profil d'écoulement (ex. : installation de déflecteurs dans le cas d'un écoulement préférentiel). Par la suite, l'utilisateur reprend les mesurages en procédant à un nouvel essai complet.

Lorsqu'il n'est pas possible de stabiliser le débit de l'écoulement ou d'apporter les correctifs requis pour respecter le critère de 5 % sur la variation de hauteur d'eau, il peut être nécessaire d'utiliser une autre méthode de référence ou un autre équipement de mesure.

Si la méthode d'exploration du champ des vitesses est tout de même conservée, ce choix doit être justifié et un minimum de trois essais complets doivent être effectués. De plus, l'effet de la variation de la hauteur d'eau sur la mesure du débit de l'essai obtenu doit être évalué.

7.5 MESURAGE DE LA VITESSE

Pour certains appareils décrits précédemment (débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar et débitmètre hauteur – vitesse Doppler), la vitesse mesurée sur une période minimale de 30 minutes s'établit à l'aide d'un algorithme pour l'ensemble de la section mouillée et les informations des sections 7.6 à 7.9 ne s'appliquent pas. Par contre, l'utilisation du vélocimètre acoustique Doppler et des moulinets rotatif et électromagnétique requièrent de procéder aux mesurages de la vitesse par verticale.

Les mesures effectuées sur chaque verticale sont appliquées sur une largeur à droite et à gauche de cette verticale, et plus les verticales sont espacées, plus cette zone d'application est importante (Figure 95). Ainsi, un écoulement homogène et régulier, associé à une largeur restreinte de la section de mesurage, requiert généralement un nombre de verticales réduit, et inversement.

7.6 ÉTABLISSEMENT DU NOMBRE DE VERTICALES

Le nombre de verticales retenu doit être suffisant pour tenir compte des variations de l'aire de chacune des zones d'application dues à l'irrégularité du fond du canal. Chaque verticale devrait comporter minimalement un point de mesure de la vitesse.

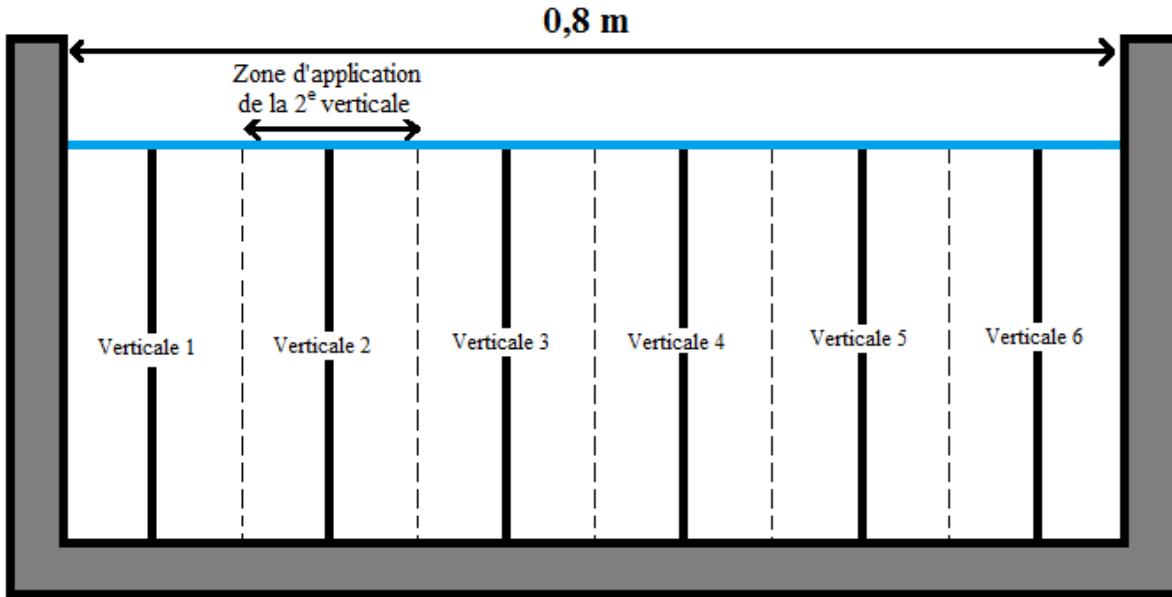


Figure 95 : Illustration de la zone d'application de six verticales dans un canal à surface libre et à fond régulier

Selon ISO 748:2007, le nombre minimal (n) de verticales requis pour une section de mesurage est établi en fonction de la largeur de cette section :

- Largeur de la section de mesurage $< 0,5 \text{ m}$ $n = 5 \text{ ou } 6$
- Largeur de la section de mesurage $\geq 0,5 \text{ m}$ et $< 1 \text{ m}$ $n = 6 \text{ ou } 7$
- Largeur de la section de mesurage $> 1 \text{ m}$ et $< 3 \text{ m}$ $n = 7 \text{ à } 12$
- Largeur de la section de mesurage $> 3 \text{ m}$ et $< 5 \text{ m}$ $n = 13 \text{ à } 16$

Pour les largeurs de section de mesurage $\geq 5 \text{ m}$, le nombre de verticales doit être choisi de telle sorte que le débit dans chaque zone d'application soit, dans la mesure du possible, inférieur à 5 % du débit total et ne dépasse en aucun cas 10 %. Par exemple :

Débit total de la section de mesurage = $200 \text{ m}^3/\text{s}$

20 sections \rightarrow Débit de chaque zone d'application $\approx 10 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\frac{10 \text{ m}^3/\text{s}}{200 \text{ m}^3/\text{s}} = 5 \%$$

7.7 DURÉE ET FRÉQUENCE DES MESURES DE VITESSE ET NOMBRE D'ESSAIS

Chaque mesurage de vitesse doit avoir une durée égale ou supérieure à 30 secondes et être répété consécutivement au moins trois fois sur la verticale lors de chaque essai, et idéalement cinq fois par essai. Le temps d'exposition peut être différent pour les courantomètres électromagnétique et acoustique. Il est important de respecter le temps d'exposition prescrit dans la documentation du fabricant s'il est supérieur à 30 secondes.

L'instrument de mesure doit être aligné dans le sens de l'écoulement, en général perpendiculairement à la section de mesurage. Si l'écoulement n'est pas perpendiculaire à la section, il faut laisser le moulinet s'aligner dans la direction de l'écoulement, mesurer, à l'aide d'un équipement approprié, son angle (θ) par rapport à la perpendiculaire de la section et appliquer le facteur de correction suivant sur la vitesse mesurée :

$$V_{\text{corrigée}} : V_{\text{mesurée}} \cos \theta$$

(29)

Certains moulinets permettent de mesurer directement la composante normale de la vitesse lorsqu'ils sont maintenus perpendiculairement à la section de mesurage dans un écoulement oblique. Dans ce cas, cette correction ne serait pas appliquée. Lors de l'utilisation de tels moulinets, il faut toutefois respecter l'angle maximal prescrit par le fabricant.

Une série de moulinets peut être installée sur la même perche pour que les données de vitesse soient recueillies plus rapidement sur une même verticale. Dans ce cas, l'utilisateur doit s'assurer que les moulinets n'interfèrent pas entre eux.

Pour chaque essai, trois mesures de vitesse sont donc effectuées consécutivement à chaque verticale. Par exemple, si trois essais sont effectués, ils se déroulent comme suit :

Essai 1 : 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 1
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 2
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 3
 Etc. pour chaque verticale

Essai 2 : 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 1
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 2
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 3
 Etc. pour chaque verticale

Essai 3 : 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 1
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 2
 3 mesures de vitesse de 30 secondes sur la verticale 3
 Etc. pour chaque verticale

Dans certains cas, par exemple en milieu naturel, lorsque le niveau d'eau est variable, que plusieurs verticales sont nécessaires et que la durée des mesures de vitesse doit s'allonger (ex. : 60 secondes ou plus), il peut devenir difficile de procéder à trois mesures consécutives de vitesse sur chaque verticale tout en respectant tous les critères de la méthode, particulièrement en ce qui concerne l'écart maximal de 5 % entre la hauteur d'eau la plus faible et la plus élevée, par rapport à la hauteur d'eau la plus élevée au cours de l'essai.

En effet, dans ces conditions, la durée de l'essai s'allonge de façon importante, ce qui implique un risque de variation du niveau d'eau en cours d'essai. Afin de remédier à cette situation, on peut dans ce cas maintenir le même nombre de mesures de vitesse, mais en effectuant les mesures sur chaque verticale de façon non consécutive. Le critère de 5 % sur la variation de

hauteur est donc calculé pour chaque série de verticales. Par exemple, dans le cas de trois essais :

Essai 1 : 1^{re} mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 2^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 3^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$

Essai 2 : 1^{re} mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 2^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 3^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$

Essai 3 : 1^{re} mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 2^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$
 3^e mesure de vitesse de 60 secondes pour les verticales 1 à 20 → $\Delta h \leq 5\%$

Dans une telle situation exceptionnelle, le rapport de vérification doit toutefois présenter le contexte et les raisons expliquant cette adaptation de la méthode.

Théoriquement, les vitesses mesurées en un même point (ex. : 0,6H) sur chaque verticale devraient être du même ordre de grandeur. Il est recommandé de respecter un écart maximal de 5 % entre la plus basse et la plus haute vitesse, par rapport à la plus haute vitesse, mesuré sur chaque verticale.

Lorsque la méthode d'exploration du champ des vitesses est utilisée pour vérifier l'exactitude d'un élément primaire en place, il est requis de procéder à au moins un essai respectant tous les critères d'application de la méthode. Il est aussi recommandé de procéder à des essais à trois niveaux de débit (min – moy – max de l'intervalle de mesure du système de mesure du débit *in situ*).

Si un ou des critères ne sont pas respectés au cours de l'essai (ex. : variation de la hauteur d'eau au cours de l'essai > 5 %, variation de la vitesse sur une verticale > 5 %, etc.), il faut en déterminer la cause, en évaluer l'impact sur la mesure du débit et évaluer la possibilité d'utiliser une autre méthode de référence.

Dans le cas où la méthode d'exploration du champ des vitesses demeure la meilleure option, trois essais complets doivent être effectués pour le niveau de débit problématique. L'écart maximal toléré doit dans ce cas être respecté pour chacun de ces essais et non sur la moyenne des trois essais, et les données brutes de chacun des essais doivent être présentées dans le rapport de vérification.

7.8 DÉTERMINATION DE LA VITESSE MOYENNE SUR UNE VERTICALE

La vitesse de l'écoulement est variable selon la profondeur à laquelle s'effectue la mesure. La courbe de la Figure 96 représente cette relation entre la profondeur et la vitesse de l'écoulement le long d'une verticale dans un cours d'eau ou un canal.

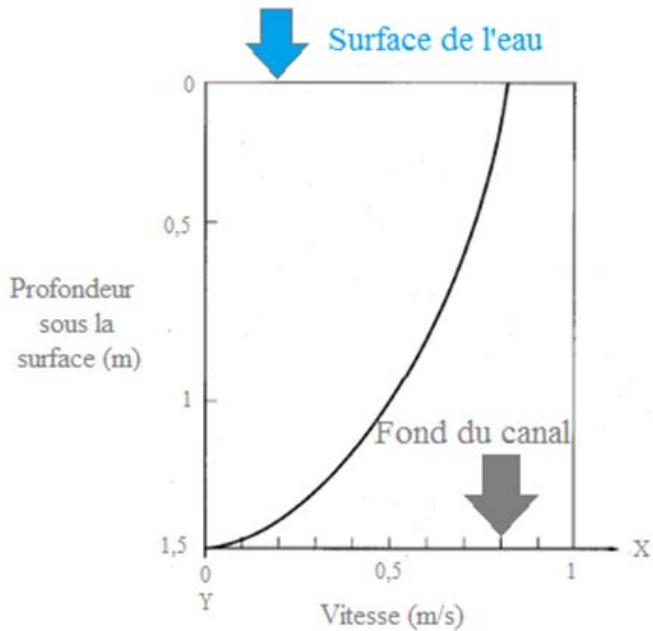


Figure 96 : Exemple d'une courbe de répartition des vitesses sur une verticale pour un écoulement laminaire

Différentes méthodes de détermination de la vitesse peuvent être favorisées selon le temps disponible pour l'essai ou encore en fonction des conditions d'écoulement, des caractéristiques de la section de mesurage et du degré d'exactitude recherché. L'une de ces méthodes peut être sélectionnée :

Méthode de distribution des vitesses

Les valeurs de vitesse sont obtenues par des relevés effectués en un certain nombre de points le long de chaque verticale entre la surface de l'eau et le fond du canal. Le nombre de points et l'espacement entre deux points de mesure le long d'une verticale doivent être tels que la différence des relevés entre deux points adjacents ne dépasse pas 20 % de la vitesse la plus élevée.

Cette méthode peut offrir une exactitude supérieure, compte tenu du nombre de mesures de vitesses effectuées sur chaque verticale. Par contre, cet avantage peut représenter une source d'erreur puisqu'une plus longue période est requise pour effectuer les mesurages, période pendant laquelle les conditions d'écoulement peuvent changer.

La norme ISO 748 décrit les calculs de vitesse à appliquer.

Méthodes utilisant un nombre réduit de points (aussi nommée méthodes par points de vitesse)

Si, pour un canal donné, il est possible de présumer que les vitesses mesurées en certains points peuvent être considérées comme étant représentatives de l'écoulement sur toute la

verticale, le recours à l'une ou l'autre des méthodes utilisant un nombre réduit de points présentées ci-dessous est envisageable.

Les méthodes utilisant un nombre réduit de points sont une version simplifiée de la méthode de distribution des vitesses et elles peuvent être appliquées selon certaines conditions reliées à la profondeur d'eau et l'appareil utilisé. Elles permettent d'obtenir une évaluation plus rapide des débits, ce qui en fait les méthodes privilégiées, particulièrement dans le cadre de la vérification de l'exactitude des systèmes de mesure du débit. Selon ces méthodes, le niveau des points de mesure peut se situer à différentes hauteurs en fonction de la situation rencontrée (voir Figure 97 et Figure 98) :

Méthode en un point :

- Les relevés de la vitesse sont effectués sur un point unique sur chaque verticale (0,6 fois la profondeur d'eau) mesurée au-dessous de la surface;
- Elle est applicable pour une hauteur d'eau égale ou inférieure à 0,76 m;

Méthode en deux points :

- Les relevés de la vitesse sont effectués sur chaque verticale en deux points (0,2 et 0,8 fois la profondeur d'eau) mesurée au-dessous de la surface. La vitesse moyenne de l'écoulement correspond à la moyenne arithmétique des relevés;
- Elle offre une exactitude supérieure comparativement à la méthode en un point, particulièrement lorsque la profondeur d'eau est plus grande, puisque les effets de variations dans l'écoulement de surface et du fond deviennent alors significatifs;
- Elle est applicable pour une hauteur d'eau supérieure à 0,76 m avec un profil d'écoulement laminaire;

Méthode en trois points :

- Les relevés de la vitesse sont effectués sur chaque verticale en trois points (0,2, 0,6 et 0,8 fois la profondeur d'eau) mesurée au-dessous de la surface. La vitesse moyenne de l'écoulement est calculée selon l'équation 30;
- Elle est applicable pour une hauteur d'eau supérieure à 0,76 m avec une distribution anormale des vitesses (ex. : régime d'écoulement turbulent).

Des méthodes à 5 et 6 points ainsi que la méthode du point unique en surface peuvent également être utilisées (voir la norme ISO 748).

En cas de doute ou pour une nouvelle section de mesurage, il importe d'évaluer l'exactitude des méthodes utilisant un nombre réduit de points avant d'y recourir. Pour ce faire, des mesurages préliminaires obtenus à l'aide des méthodes utilisant un nombre réduit de points sont comparés avec les résultats obtenus par la méthode de distribution des vitesses.

Si les caractéristiques physiques de la section de mesurage et les conditions d'écoulement sont bien connues (ex. : canal de mesure parfaitement installé, non déformé et bien

entretenu), on peut recourir aux méthodes utilisant un nombre réduit de points en présumant que les profils de vitesses théoriques sur une verticale correspondent à une courbe de distribution standard.

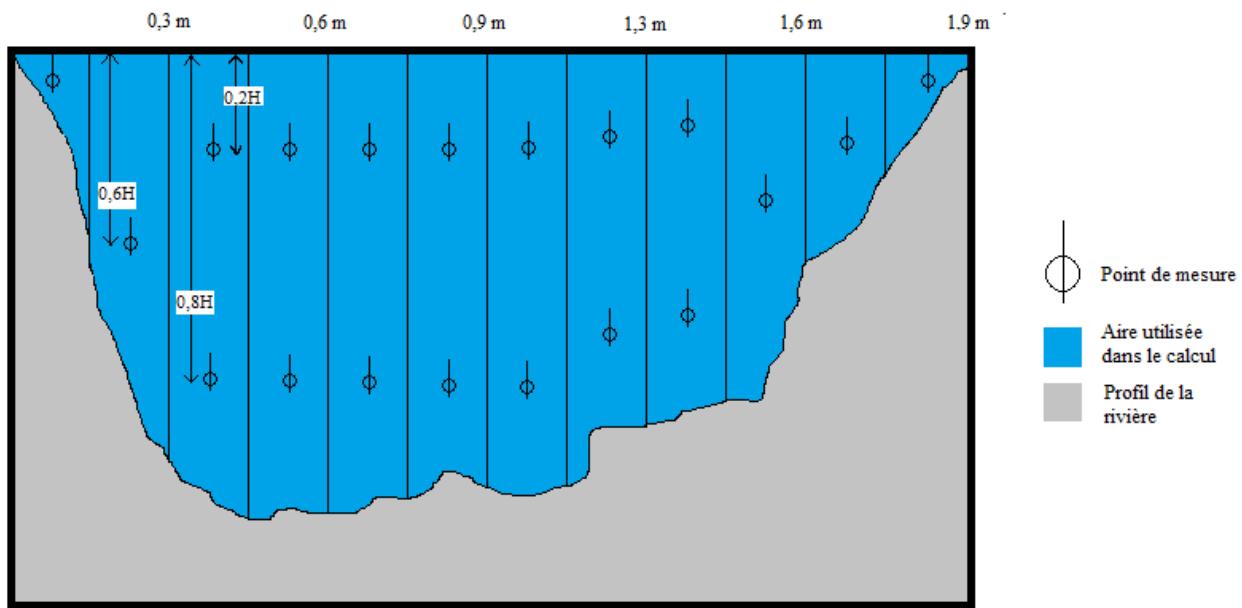


Figure 97 : Emplacement des points de mesure dans un cours d'eau naturel pour l'application des méthodes utilisant un nombre réduit de points

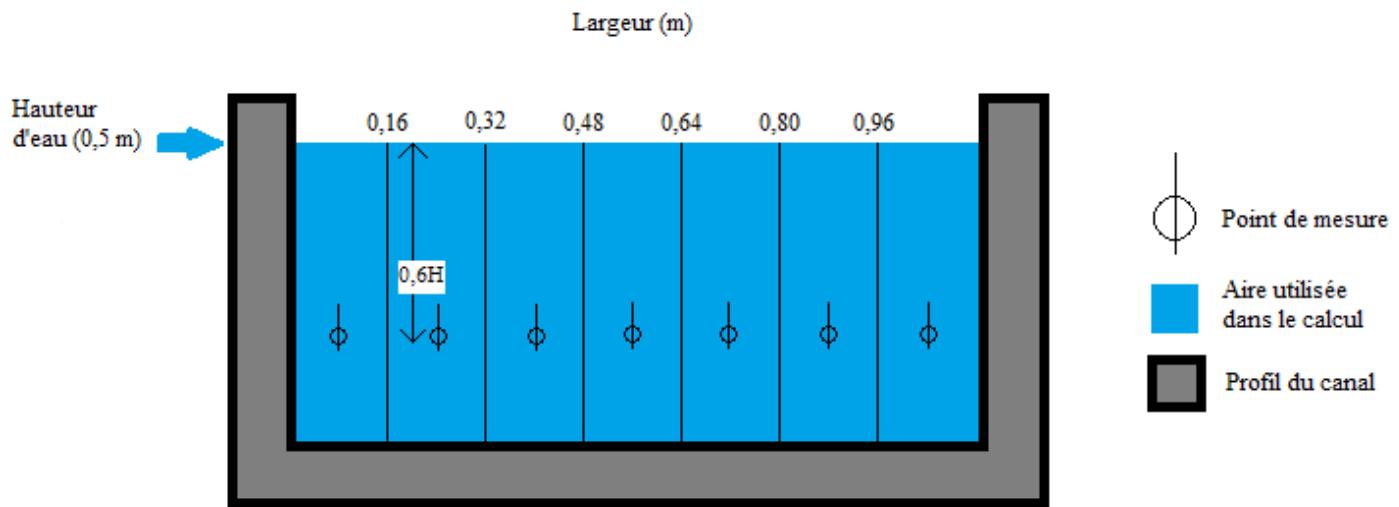


Figure 98 : Emplacement des points de mesure dans un canal artificiel rectangulaire pour l'application des méthodes utilisant un nombre réduit de points

Dans le cas des méthodes utilisant un nombre réduit de points, la vitesse moyenne unitaire à utiliser pour les calculs est :

- Méthode à point unique : la valeur mesurée est prise comme vitesse moyenne sur la verticale;
- Méthode à deux points : la moyenne arithmétique des deux valeurs est prise comme vitesse moyenne sur la verticale;
- Méthode à trois points : la valeur à 0,6 est pondérée et la vitesse moyenne est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\bar{v} = 0,25 (v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}) \quad (30)$$

Pour plus de détails sur les méthodes à 5 et 6 points, il est conseillé de consulter la norme ISO 748.

Méthode par intégration de vitesse

Avec cette méthode, le moulinet est déplacé sur chaque verticale, à une vitesse uniforme, de haut en bas et de bas en haut, sur la totalité de la profondeur. Cette technique permet donc d'obtenir rapidement une mesure moyenne de la vitesse sur une verticale (voir ISO 748 pour plus de détails).

7.9 CAUSES D'ERREUR DE LA MÉTHODE D'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES

Certains fabricants d'appareils accordent une erreur de mesure (souvent identifiée comme étant la « précision » de l'appareil) avoisinant 1 %, ce qui fait référence à l'erreur de mesure théorique. L'exactitude est très variable selon le type d'effluent et les conditions d'installation.

L'utilisation de la méthode dans un canal naturel (ex. : dans une rivière), dont les conditions d'application n'ont pas été respectées, peut amener une erreur de 10 à 15 % dans certains cas. Toutefois, dans un canal fabriqué (ex. : canal Parshall), lorsque toutes les précautions sont prises et que les mesurages sont effectués dans des conditions optimales, l'erreur de la méthode diminue et se situe aux environs de 5 à 10 %.

Dans le cas où un écart important est constaté entre le débit *in situ* et le débit de l'essai résultant de l'application de cette méthode de vérification, il est tout d'abord recommandé de valider l'application de la méthode avant de conclure à la non-conformité de l'installation et d'y apporter des correctifs.

Lorsqu'applicable, le calcul de l'incertitude²⁸ doit tenir compte de toutes les sources d'erreur associées aux mesurages dont certaines sont systématiques et d'autres, aléatoires. Ces causes d'erreur varient en fonction de l'équipement utilisé et portent par exemple sur :

- Le choix de l'équipement;
- Le nombre limité de verticales;

²⁸ ISO a établi expérimentalement et inclut, dans la version 2007 de la norme ISO 748, des tableaux de valeurs d'incertitudes pouvant être utilisés pour faciliter le calcul de l'incertitude globale. La méthode de calcul est présentée à la section 9 de la norme. Une méthode équivalente peut aussi être utilisée.

- Le nombre limité de points de mesure sur la verticale;
- Les limitations techniques de l'appareil de mesure (largeur, profondeur, vitesse);
- L'erreur liée à l'état, à l'entretien et à l'étalonnage de l'appareil;
- L'erreur liée à la mesure de la largeur des verticales et de l'aire de la section mouillée;
- L'erreur attribuable au temps limité d'exposition de l'appareil pour le mesurage des vitesses en un point donné;
- L'appareil utilisé dans les liquides dont les caractéristiques physiques ne sont pas semblables à celles des liquides dans lesquels il a été étalonné;
- Le choix de la méthode de calcul de débit;
- L'appareil utilisé à l'extérieur de l'intervalle de mesure des vitesses pour laquelle il a été étalonné;
- Le dispositif utilisé pour le mesurage (perche, câble de suspension, etc.), différent de celui employé pour l'étalonnage du moulinet, ce qui peut entraîner une erreur systématique;
- Le fait que l'appareil a été manipulé inadéquatement ou n'est pas resté à la position appropriée au cours des mesurages (ex. : dérive à partir d'un bateau).

Si les mesurages n'ont pas été effectués dans des conditions d'écoulement optimales, il convient aussi de considérer les causes d'erreur suivantes :

- Perturbation du fonctionnement de l'appareil par les matières en suspension (débris, algues, etc.);
- Présence de glace;
- Écoulement oblique dont les facteurs de correction appropriés ne sont pas connus avec précision;
- Instabilité ou perturbation de l'écoulement;
- Perturbation de la surface de l'eau par le vent.

7.10 UTILISATION DE LA MÉTHODE D'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES EN PRÉSENCE D'UN COUVERT DE GLACE

Lorsque le mesurage du débit doit être effectué en hiver et que le canal est recouvert en tout ou en partie de glace, la méthode d'exploration du champ des vitesses peut être utilisée dans le respect de certaines conditions. Davantage d'informations à propos de cette méthode sont disponibles dans la norme ISO 9196.

7.11 UTILISATION DE LA MÉTHODE D'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES EN TANT QUE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit *in situ*, la méthode d'exploration du champ des vitesses est utilisée en tant que méthode de référence. Dans ce but, les différentes méthodes de détermination de la vitesse moyenne sur une verticale sont acceptables et les méthodes utilisant un nombre réduit de points sont d'ailleurs souvent privilégiées.

La valeur de débit ainsi mesurée sera comparée avec la mesure simultanée du débit *in situ* (par le système de mesure en vérification) pour le calcul de l'écart entre ces deux valeurs de débit. Il sera ainsi possible de valider si l'écart maximal toléré (ex. : par un règlement) est respecté. Pour procéder adéquatement à la vérification de l'exactitude, il est requis d'appliquer les éléments décrits à la section 6 du présent document. De plus, la section 12 décrit les précisions relatives au rapport à produire afin qu'il soit complet.

Exploration du champ des vitesses...



Méthode de référence permettant de déduire le débit à partir de l'aire de la section mouillée et de la vitesse d'écoulement dans la section transversale.

La mesure de la vitesse s'effectue par verticale ou à l'aide d'un algorithme pour l'ensemble de la section mouillée en fonction de l'appareil utilisé: moulinet rotatif (courantomètre mécanique), moulinet électromagnétique (courantomètre électromagnétique), vélocimètre acoustique Doppler (courantomètre acoustique), débitmètre hauteur – vitesse Doppler, débitmètre hauteur – vitesse sans contact radar.

L'appareil requiert annuellement un étalonnage ou une vérification par des essais comparatifs du banc d'essai.

La section de mesurage des vitesses doit présenter des conditions d'écoulement optimales et tenir compte des conditions d'utilisation de l'appareil.

L'annexe 5 présente un exemple de grille terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit à l'aide de cette méthode.

8 MÉTHODE DE DILUTION D'UN TRACEUR

Diverses techniques sont utilisées pour la mesure du débit à l'aide d'éléments traceurs. Le présent document couvre les méthodes présentées à la Figure 99.

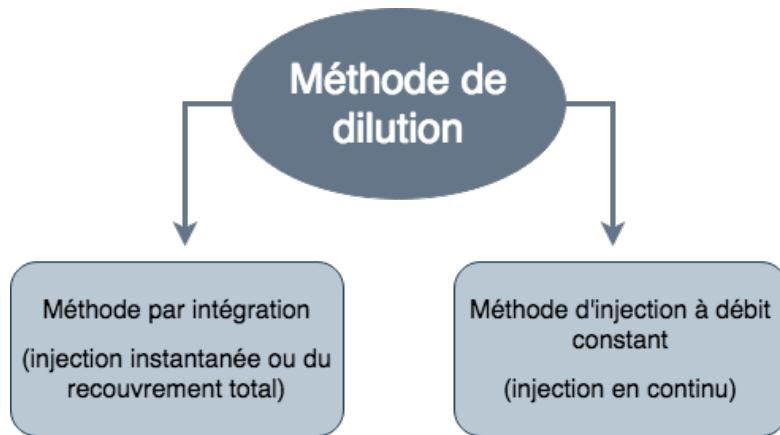


Figure 99 : Méthodes utilisées pour la mesure du débit à l'aide d'éléments traceurs

Cette méthode permet d'établir une mesure de débit indépendante de celle du système de mesure *in situ* pour qu'elle soit utilisée en tant que méthode de référence dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit.

8.1 GÉNÉRALITÉS

Les principes de base de la méthode de mesurage du débit par dilution reposent sur :

- La variation de la concentration d'un traceur entre son lieu d'injection et le lieu de prélèvement (section d'échantillonnage);
- La conservation de la masse dudit traceur entre ces deux points.

Cette méthode de mesurage consiste à injecter un traceur (de concentration connue) en un point d'un canal (point d'injection) et à suivre l'évolution de sa concentration au niveau d'une section située à l'aval (section d'échantillonnage). Par exemple, pour une même quantité de traceur injectée, plus le débit de l'écoulement sera élevé, plus le traceur sera dilué à la section d'échantillonnage.

La distance entre le point d'injection et la section aval choisie doit être suffisante pour que le mélange du traceur avec l'eau puisse être complètement réalisé (dispersion verticale et latérale). La longueur du tronçon située entre les deux sections transversales se nomme « bief ». Le processus de dispersion du traceur est généralement plus lent le long des parois du canal qu'au centre (Figure 100). Si le bief de mesurage est trop court, le traceur sera beaucoup plus concentré au centre du canal (Figure 100, point b) que près des parois (Figure 100, points a et c). Une mesure précise est alors difficilement réalisable.

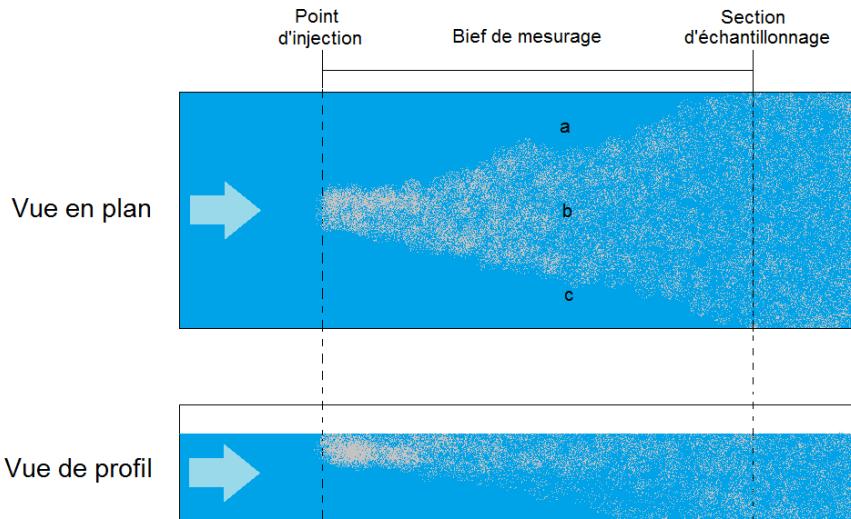


Figure 100 : Dispersion latérale et verticale du traceur en fonction du bief de mesure

Lorsque le bief de mesure est idéal, le temps de mesure du traceur (T_D) ne sera pas trop long et l'échantillonnage à plusieurs points latéraux faisable. Si le bief de mesure est trop long, le mélange sera quasi parfait (Figure 101). Par contre, le temps de mesure du traceur sera long et des difficultés dans la mesure de faibles concentrations aux extrémités de la courbe pourraient survenir. Un long bief de mesure entraîne également davantage de risques de perte de traceur.

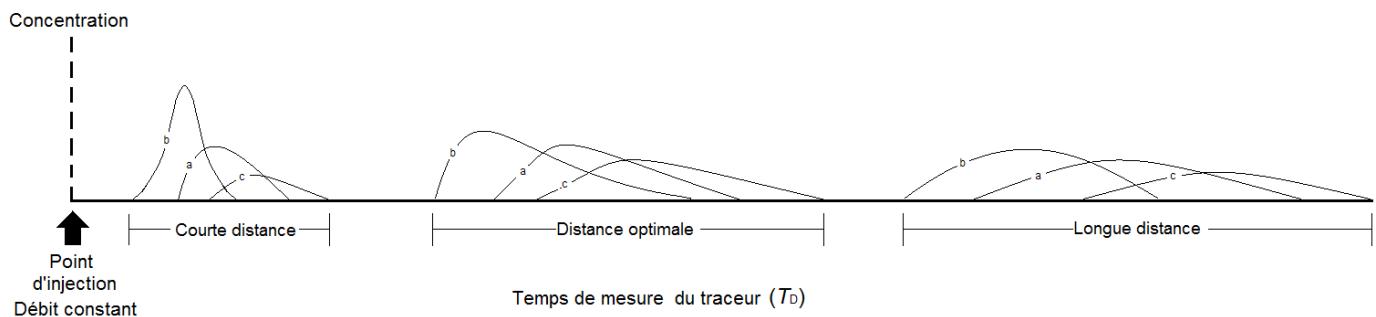


Figure 101 : Courbes de réponse typique observées à plusieurs points latéraux à la suite d'une injection instantanée réalisée au centre d'un canal

Dans la pratique, les méthodes de dilution sont réservées aux petits canaux en raison de la longueur du bief de mesure requis pour les gros canaux. En effet, une estimation grossière du bief de mesure équivaut à environ 25 fois la largeur du canal. Davantage de détails sont fournis sur l'estimation du bief de mesure à la section 8.5.1.

8.2 CONDITIONS D'APPLICATION

La méthode de jaugeage par dilution implique que certaines conditions soient respectées :

- Le traceur est convenablement choisi;

- Le débit d'écoulement (Q) demeure constant pendant toute la durée de l'essai (variation du débit inférieur à 5 % entre les débits minimal et maximal);
- La section d'échantillonnage située en aval est suffisamment éloignée du point d'injection pour que la solution injectée soit uniformément mélangée sur toute la largeur du canal;
- Le canal ne contient pas de zone d'eau morte;
- Il n'y a pas d'apport ou de perte d'eau dans la section choisie;
- Tout le traceur passe par la section d'échantillonnage.

La méthode de jaugeage par dilution peut être mise en œuvre, quels que soient les débits. Elle est particulièrement adaptée aux mesures en crues, lorsque l'écoulement est très turbulent. Tout particulièrement, la méthode de dilution est utile :

- Lorsqu'il est difficile d'utiliser un débitmètre en raison d'un écoulement très rapide et turbulent;
- En présence de débris, de dépôts ou de forte végétation dans le tronçon de mesure (cet aspect influencera toutefois le choix du traceur);
- Lorsque le bief de mesurage est difficilement accessible ou irrégulier;
- Lorsque l'aire de la section de mesurage transversale ne peut être mesurée précisément ou qu'elle varie pendant l'essai;
- Pour mesurer les rejets turbulents avec des gradients escarpés où la mesure à l'aide de la méthode d'exploration du champ des vitesses est impraticable.

Le Tableau 36 présente les avantages et inconvénients de la méthode de dilution.

Tableau 36 : Avantages et inconvénients de la méthode de dilution

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permet la mesure du débit alors que d'autres méthodes ne le permettent pas; ▪ Permet la mesure de grands débits; ▪ Permet de contre-vérifier, sur le site, des installations de mesure ou de transport des liquides; ▪ Ne nécessite pas de connaître les dimensions de l'aire d'écoulement; ▪ Permet la mesure des débits dans des endroits reculés et difficiles d'accès; ▪ Permet la mesure de débit en conduite fermée et en conduite découvert. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le coût élevé de certains traceurs; ▪ Ne fournit généralement que des valeurs ponctuelles de débit; ▪ La procédure requiert un personnel entraîné et expérimenté. Nécessite habituellement au moins trois personnes; ▪ La procédure exige beaucoup de temps; ▪ Des paramètres pouvant causer de l'interférence 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.

8.3 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE DILUTION PAR INTÉGRATION (OU INJECTION INSTANTANÉE)

Dans cette méthode, un volume connu de traceur (V) d'une solution de concentration initiale (C_1) est injecté rapidement dans une section d'un canal d'écoulement. Dans la seconde section, la concentration en traceur dilué (C_2) est mesurée pendant un temps suffisamment long pour que tout le traceur soit passé (Figure 102).

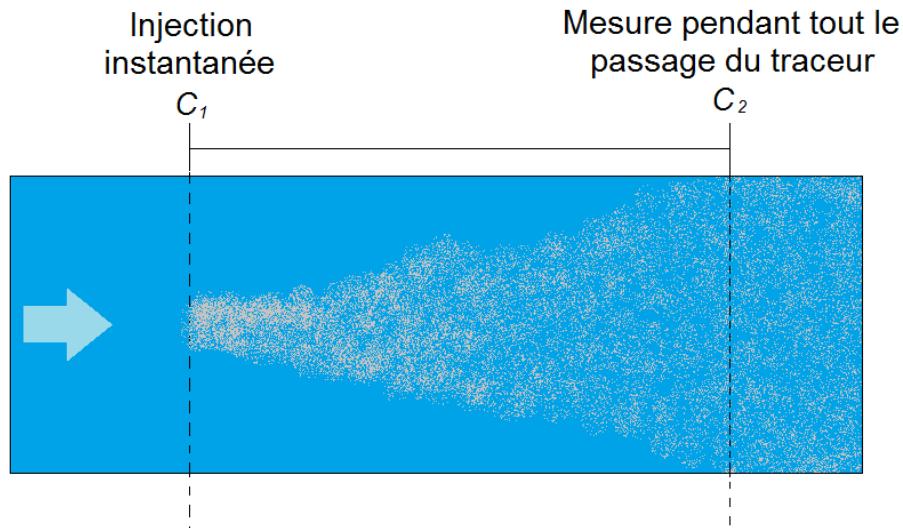


Figure 102 : Illustration de la méthode de dilution par intégration

La Figure 103 présente la forme que devrait avoir une courbe de restitution du traceur dans un canal, observée grâce aux données recueillies par un instrument de mesure.

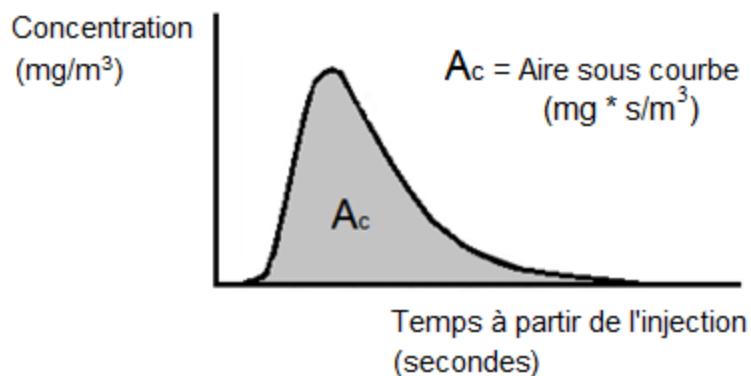


Figure 103 : Courbe théorique de restitution typique de la concentration en fonction du temps

Plusieurs facteurs peuvent engendrer une courbe ne possédant pas les caractéristiques de la courbe théorique, notamment une injection non instantanée ou des zones d'eau stagnante. Dans de telles situations, on devra s'assurer que tout le traceur est passé et que le pourcentage de récupération est adéquat.

Le principe de conservation de la masse permet d'obtenir le débit selon la formule suivante :

$$Q = \frac{M}{Ac} \quad (31)$$

Où	Q	Débit de l'écoulement (ex. : m^3/s);
	M	Masse de traceur injectée (ex. : mg);
	Ac	Aire sous la courbe obtenue après un mélange adéquat du traceur (ex. : $\text{mg} * \text{s}/\text{m}^3$).

En pratique, des échantillons sont prélevés dans la section d'échantillonnage à pas de temps constant. Dans ces conditions, le débit est donné par l'équation suivante :

$$Q = \frac{V c_1}{\Delta t \sum (c_2 - c_{bf})} \quad (32)$$

Où	Q	Débit de l'écoulement (ex. : m^3/s);
	V	Volume de la solution injectée (ex. : m^3);
	c_1	Concentration en traceur de la solution injectée (ex. : mg/l);
	Δt	Intervalle de temps entre le début et la fin du prélèvement des échantillons (ex. : secondes);
	c_2	Concentration du traceur dilué (échantillon prélevé à la section d'échantillonnage) (ex. : mg/l);
	c_{bf}	Concentration du bruit de fond (ex. : mg/l).

Il est aussi possible de procéder avec un échantillon moyen (prélèvement individuel à pas de temps constant ou prélèvement continu à débit constant). Alors, le débit est donné par l'équation suivante :

$$Q = \frac{V c_1}{t_p (\bar{c}_2 - c_{bf})} \quad (33)$$

Où	Q	Débit de l'écoulement (ex. : m^3/s);
	V	Volume de la solution injectée (ex. : m^3);
	c_1	Concentration en traceur de la solution injectée (ex. : mg/l);
	t_p	Temps de passage du nuage de traceur dans la section d'échantillonnage (ex. : secondes);
	\bar{c}_2	Concentration moyenne du traceur dilué (échantillon prélevé à la section d'échantillonnage) (ex. : mg/l);
	c_{bf}	Concentration du bruit de fond (ex. : mg/l).

Le Tableau 37 présente les avantages et inconvénients de la méthode par intégration.

Tableau 37 : Avantages et inconvénients de la méthode par intégration

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'injection du traceur ne nécessite aucun instrument sophistiqué; ▪ La quantité de traceur requise pour réaliser la technique d'injection instantanée est moindre que celle requise pour la technique d'injection en continu. Pour la mesure de faibles débits, la quantité de traceur requise est de trois à cinq fois moins grande que celle qui est nécessaire avec la méthode à injection continue. Pour la mesure de débits élevés, la différence est minime; ▪ Seule cette méthode peut être utilisée pour les traceurs radioactifs. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La totalité de la séquence doit être échantillonnée; ▪ Cette méthode nécessite le prélèvement de nombreux échantillons pour tracer la courbe (un minimum de 30 échantillons est requis); ▪ Son utilisation est limitée à la mesure de tronçon où le débit est stable (variation du débit inférieure à 5 %); ▪ Le succès de l'application de cette méthode repose sur la récupération de la totalité de la masse de traceur injecté au point de contrôle et requiert une très grande précision de la mesure de l'aire sous la courbe de restitution.

8.4 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE DILUTION PAR INJECTION À DÉBIT CONSTANT (OU EN CONTINU)

Dans cette méthode, un traceur de concentration initiale (C_1) est injecté à débit constant et connu (q) dans une section d'un cours d'eau ou d'un canal. Dans la seconde section, la concentration du traceur dilué (C_2) est mesurée pendant un temps suffisamment long pour permettre de vérifier qu'un bon mélange est obtenu et que la concentration du traceur atteint une valeur constante (plateau).

À un débit constant, l'injection continue d'une série de traceur de concentration similaire, à des intervalles de temps similaires, donnera des courbes similaires. La Figure 104 présente la superposition de plusieurs courbes de concentration en fonction du temps.

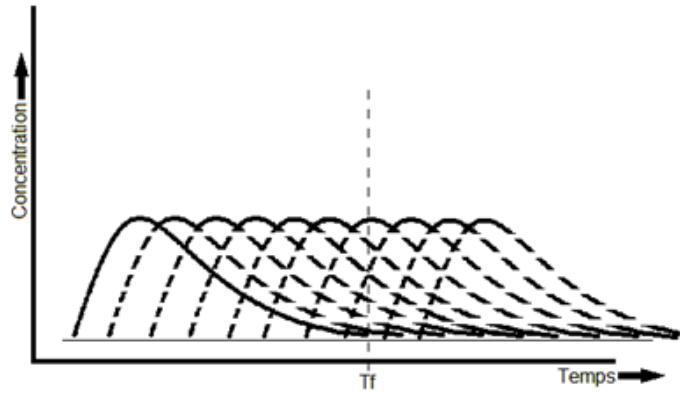


Figure 104 : Superposition des courbes de la concentration en fonction du temps à la suite d'une injection instantanée de traceur

Les courbes individuelles se superposeraient pour devenir indistinctes. Au temps correspondant à l'extrémité finale de la 1^{re} injection (T_f), un équilibre serait atteint. Cet équilibre générera un plateau à concentration constante. La Figure 105 présente cette situation et l'obtention du plateau au temps T_f.

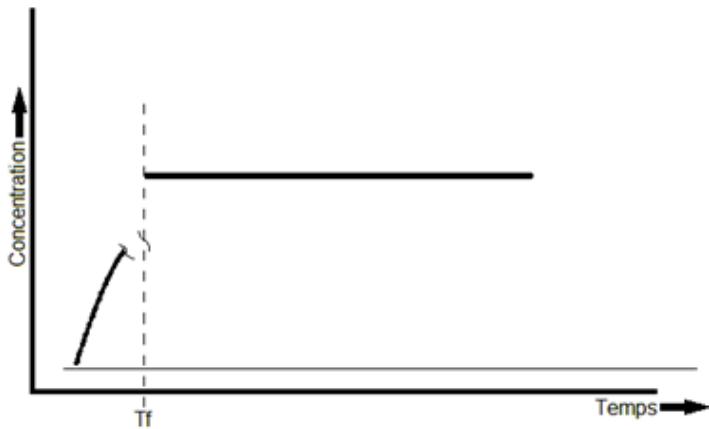


Figure 105 : Représentation du plateau obtenu au temps T_f

L'avantage premier de la méthode par injection à débit constant est que la totalité de la courbe n'a pas à être mesurée. Une fois l'équilibre atteint, le principe de conservation de la masse s'applique et le débit peut être établi à partir de l'équation suivante :

$$Q = q \left(\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_{bf}} \right) \quad (34)$$

- Où Q Débit de l'écoulement à mesurer (ex. : m³/s);
 q Débit d'injection du traceur (ex. : m³/s);
 C_{bf} Concentration naturelle du traceur dans l'écoulement (ex. : mg/l);
 C_1 Concentration d'injection du traceur (ex. : mg/l);
 C_2 Concentration du traceur à la section d'échantillonnage (ex. : mg/l).

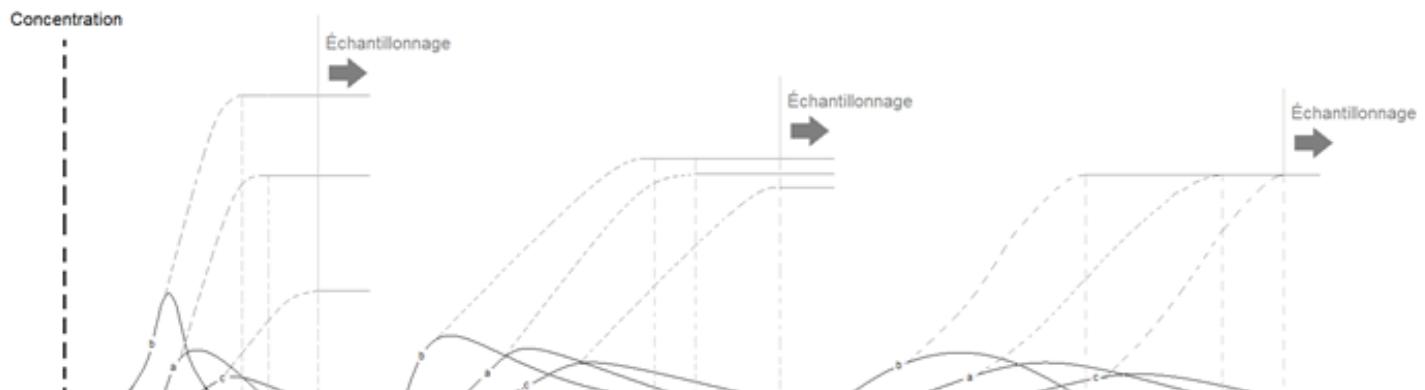
Toutefois, puisque C_1 est habituellement considérée comme beaucoup plus élevée que C_2 et que C_{bf} égale souvent 0, il est coutume de simplifier l'équation de cette façon :

$$Q = q \frac{c_1}{c_2} \quad (35)$$

La méthode repose sur le ratio entre la concentration de la solution injectée (C_1) et celle de l'écoulement à la section d'échantillonnage (C_2). Il est primordial d'utiliser la même solution pour préparer les standards et la solution d'injection.

Lorsque les échantillons sont prélevés en trois points, soit dans le cas de canaux larges, l'incidence de la longueur du bief sur les mesures obtenues à l'aide de la méthode par injection à débit constant peut être visualisée comme à la Figure 106.

Lorsque la distance est trop courte, trois plateaux de concentrations différentes sont engendrés. Dans le cas de la distance optimale, trois plateaux de concentrations similaires sont obtenus pour un temps (T_D) raisonnable. Finalement, bien que trois plateaux de concentrations identiques soient obtenus grâce à un long bief, la durée d'injection et le temps (T_D) requis pour obtenir un tel résultat sont très longs.



Longueur du bief	Courte distance	Distance optimale	Longue distance
Incidences	Aires sous les courbes non identiques. Atteinte rapide des plateaux. Niveaux de concentration différents. Mélange latéral incomplet.	Aires sous les courbes similaires. Atteinte assez rapide des plateaux. Niveaux de concentration similaires. Mélange adéquat.	Aires sous les courbes identiques. Atteinte lente des plateaux. Niveaux de concentration identiques. Mélange parfait.

Figure 106 : Incidence de la longueur du bief sur les mesures obtenues à l'aide de la méthode par injection à débit constant

Le Tableau 38 présente les avantages et inconvénients de la méthode d'injection à débit constant.

Tableau 38 : Avantages et inconvénients de la méthode d'injection à débit constant

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">La quantité d'échantillons à prélever et à analyser est moindre avec cette méthode qu'avec la méthode à injection instantanée;Permet d'effectuer des mesures dans des biefs où le débit n'est pas constant, à la condition que le temps d'injection soit prolongé et que l'intervalle de temps entre la prise des échantillons soit réduit;Permet d'obtenir une exactitude supérieure à celle obtenue par la méthode à injection instantanée.	<ul style="list-style-type: none">L'injection du traceur nécessite une attention continue et requiert l'utilisation d'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 peut être de trois à cinq fois plus grande que celle qui est nécessaire avec la méthode à injection instantanée. Pour la mesure de débits élevés, la différence est minime.

8.5 RÉALISATION DES MÉTHODES DE DILUTION (INTÉGRATION ET DÉBIT CONSTANT)

Lors de l'utilisation de l'une des méthodes de dilution, il convient de suivre les étapes de réalisation détaillées dans les sections suivantes.

8.5.1 Sélection du bief de mesurage

8.5.1.1 Généralités

Le bief de mesurage correspond au tronçon situé entre les deux sections transversales de mesurage. Ce bief doit être le plus court possible tout en étant suffisamment long pour permettre un mélange uniforme de la solution injectée sur toute la largeur du tronçon. Le mélange latéral étant le plus difficile à obtenir, le choix d'un tronçon étroit et turbulent est à préconiser.

Il ne doit y avoir ni disparition ni apparition perturbatrice de traceur dans le bief. Les zones herbeuses ou celles où un cours d'eau se partage sont à éviter.

Afin de réduire au minimum les risques d'erreur de mesure, les cas particuliers où une dérivation, des apports, des fuites, des retours ou des zones d'eau morte sont observés dans le bief devraient être évités.

Idéalement, le point d'injection devrait se situer en amont d'un étranglement.

8.5.1.2 Estimation de la longueur du bief de mesurage

La règle du pouce prévoit que la longueur du bief de mesurage devrait être équivalente à 25 fois la largeur du canal. Toutefois, les conditions de mélange parfait pourraient requérir une distance moins longue.

La longueur du bief optimale peut aussi être estimée. Ainsi, il est possible d'évaluer le temps de passage de la concentration maximale du traceur à la section d'échantillonnage par l'utilisation d'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 éviter un essai préliminaire. Le temps de passage total est environ quatre fois plus long que le temps requis pour l'arrivée de la concentration maximale.

De nombreuses formules empiriques sont également offertes pour estimer la longueur d'un bon mélange. À l'aide d'informations sur le tronçon, l'équation suivante peut être utilisée pour les cours d'eau alluviaux ou les canaux :

$$L = \frac{K v b^2}{0,63 S^{1/2} d^{3/2}} \quad (36)$$

Où L Longueur de mélange (ex. : m);
 K Constante égale à 0,1 pour une injection au milieu du courant et à 0,4 pour une injection latérale;
 v Vitesse moyenne de l'écoulement (ex. : m/s);
 b Largeur moyenne de l'écoulement (ex. : m);
 S Pente de la surface de l'écoulement (ex. : m/m);
 d Profondeur moyenne de l'écoulement (ex. : m).

Pour un écoulement canalisé artificiellement, il est indiqué d'utiliser une longueur minimale équivalant à 20 fois le diamètre de la conduite, puisque pour des conduites de faibles dimensions (< 0,6 m), l'équation précédente donne des valeurs inférieures.

Une équation ne peut fournir qu'une estimation de la distance de mélange très approximative, et des essais terrain complémentaires sont habituellement requis. On peut obtenir davantage d'information sur les équations en consultant la norme ISO 9555-1:1994.

8.5.1.3 Caractéristiques du point d'injection et de la section d'échantillonnage

Le point d'injection doit avoir été choisi au préalable pour que son accessibilité soit assurée. Il doit être situé en écoulement turbulent. Cet écoulement turbulent peut être provoqué lorsque nécessaire. L'accès au point d'injection doit être sécuritaire. Il doit être suffisamment grand pour permettre l'installation de l'équipement d'injection.

La section d'échantillonnage doit avoir été choisie au préalable, selon les critères d'accessibilité et de sécurité. La présence ou l'absence de turbulences n'a pas d'importance.

Cette section doit être suffisamment grande pour permettre l'installation de l'équipement d'échantillonnage.

8.5.2 Choix du traceur

Le traceur ne doit pas être retenu par les éléments du canal (ex. : zone morte, sonde de mesure, plantes herbacées), ni par les matières en suspension présentes dans l'écoulement, dans des proportions telles que l'exactitude de mesure est affectée.

8.5.2.1 Généralités

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

Toutefois, pour convenir aux usages prévus dans ce document, le traceur retenu ne devrait pas présenter de risque pour le milieu naturel ni pour la santé humaine et devrait être peu présent dans l'écoulement. Il devrait se mélanger facilement à l'eau, être stable dans le temps, abordable et facile à doser.

8.5.2.2 Types de traceurs

Les catégories de traceurs généralement utilisés ainsi que les types de traceurs détaillés dans le présent document sont présentés à la Figure 107.

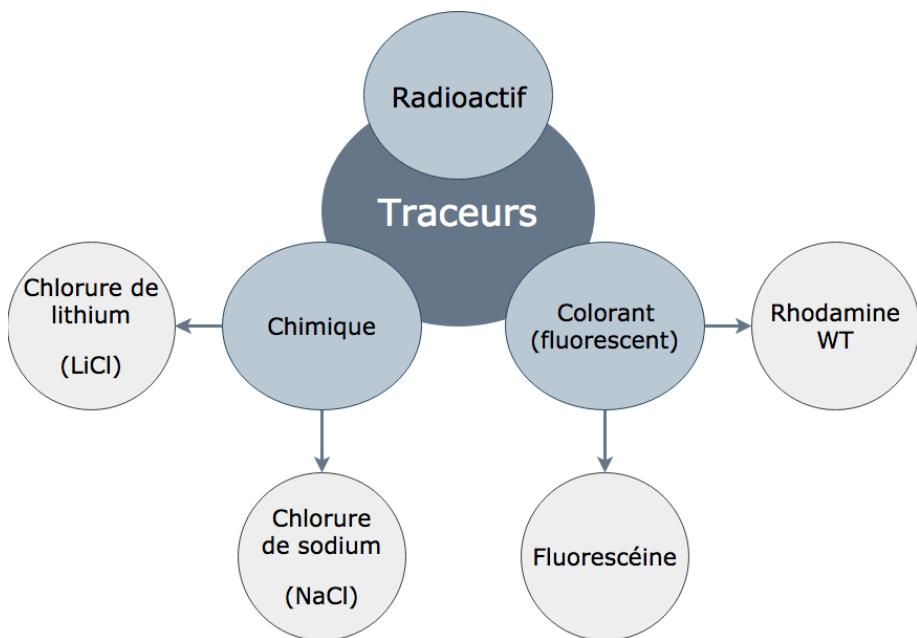


Figure 107 : Catégories et types de traceurs

8.5.2.3 Les traceurs chimiques

Les sels généralement utilisés sont : le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de lithium (LiCl) et quelques autres.

La manipulation des traceurs chimiques s'effectue suivant les pratiques normales de laboratoire. Ils sont habituellement faciles à obtenir et photochimiquement stables.

Toutefois, la limite de détection pour les traceurs chimiques est relativement plus élevée que celle des autres types de traceurs. Pour certains de ceux-ci, les plages de dosage des méthodes d'analyse sont souvent limitées, ce qui restreint leur usage à la méthode par injection à débit constant. Les caractéristiques de deux traceurs chimiques sont présentées dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Caractéristiques des traceurs chimiques

	Chlorure de lithium – LiCl	Chlorure de sodium – NaCl
Solubilité dans l'eau (à 25 °C)	~ 800 g/l	~ 350 g/l
Concentration usuelle de la solution mère	300 g/l	300 g/l
Concentration usuelle dans la section d'échantillonnage	2 à 500 µg/l de lithium (préférable de demeurer en deçà de 440 µg/l)	50 mg/l (préférable de demeurer en deçà de 230 mg/l de chlorure)
Méthode d'analyse	Spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon	Conductimétrie en continu
Limite de détection	1 µg/l	S. O. (mesure de la conductivité)
Plage d'application	1 µg/l à 5 mg/l	2 mg/l à 5,8 g/l
Divers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bruit de fond habituellement faible (< 0,1 µg/l), mais qui peut toutefois atteindre 10 mg/l près d'effluents industriels ou de mines; ▪ Mise en solution exothermique; ▪ Solutions concentrées qui sont acides; ▪ Possibilité d'adsorption sur les MES; ▪ Aucune méthode ne permettant l'analyse <i>in situ</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facilement disponible et bon marché; ▪ Simple d'utilisation; ▪ Bruit de fond qui peut être élevé (50 à 1 000 mg/l); ▪ Peut nécessiter l'utilisation de grandes quantités; ▪ Peu absorbé par la végétation et le lit du canal; ▪ Analyse <i>in situ</i>.

L'utilisation de traceurs chimiques génère des perturbations du milieu. D'après la littérature, s'ils sont utilisés à l'intérieur des dosages suggérés, ces perturbations sont de faibles magnitudes et de courte durée et ne devraient pas avoir d'impact à long terme sur le milieu. Des mesures doivent être mises en place pour que les limites acceptables ne soient pas dépassées.

8.5.2.4 Les traceurs colorants (ou fluorescents)

Un certain nombre de colorants peuvent être utilisés comme traceurs pour la mesure du débit. Une attention particulière sera accordée à la rhodamine WT et à la fluorescéine dans ce document puisqu'elles sont les traceurs colorants les plus fréquemment utilisés.

Les traceurs colorants peuvent être utilisés seuls ou être associés avec un traceur chimique pour faciliter leur suivi.

Plusieurs facteurs peuvent affecter les traceurs colorants dont : la température, le pH, la turbidité, la salinité et la fluorescence de fond.

La fluorescence de fond est un facteur qui affecte particulièrement la fluorescéine, ce qui fait que ce colorant n'est plus recommandé pour la mesure du débit dans les canaux découverts. Pour remédier à cet inconvénient, il est recommandé de prendre des mesures de la fluorescence du bruit de fond à plusieurs reprises lors de l'échantillonnage et de ne pas présumer que le bruit de fond demeure nul ou constant.

En ce qui concerne la température, le fluorimètre doit être étalonné avec des standards dont la température est semblable à celle des échantillons à analyser.

Également, un des principaux inconvénients des traceurs colorants est qu'ils se fixent assez facilement par adsorption aux matières en suspension et aux colloïdes. Cette adsorption pourrait nuire de manière significative à l'exactitude de la mesure. La surface interne de nombreuses conduites peut être couverte d'argile, d'oxyde de fer ou d'un biofilm pouvant interagir avec le colorant.

La rhodamine WT étant susceptible de réagir avec le chlore, l'eau du robinet ne devrait pas être utilisée pour la préparation des standards.

Enfin, les traceurs colorants sont également sujets à la dégradation photochimique. Pour diminuer les répercussions de cet inconvénient, il est recommandé de protéger le fluorimètre et les échantillons des rayons du soleil.

Les caractéristiques des deux traceurs colorants sont présentées dans le Tableau 40.

Lorsqu'elles sont utilisées à l'intérieur des concentrations usuelles prescrites, la fluorescéine et la rhodamine WT sont peu susceptibles de présenter un risque toxique pour la santé humaine

ou pour les organismes aquatiques communs. Selon, l'US EPA²⁹, cette affirmation est valable si la concentration est maintenue en dessous de 1 à 2 mg/l durant 24 heures à la section d'échantillonnage.

Tableau 40 : Caractéristiques des traceurs colorants (ou fluorescents)

	Fluorescéine (uranine en Europe)	Rhodamine WT
Solubilité dans l'eau (à 25 °C)	~ 250 g/l	~ 200 g/l
Concentration usuelle dans la section d'échantillonnage	5 µg/l	1 à 10 µg/l
Plage d'application	0,01 à 500 µg/l	0,01 à 500 µg/l
Méthode d'analyse	Fluorimétrie	Fluorimétrie
Limite de détection	0,01 µg/l	0,01 µg/l
Couleur	Jaune-vert	Rouge
Teneur maximale à respecter à la section d'échantillonnage	----	10 µg/l

8.5.2.5 Les traceurs radioactifs

En raison des exigences particulières liées à l'utilisation de traceurs radioactifs, ceux-ci ne seront pas abordés dans le présent document. Pour de plus amples informations sur ce type de traceur, il est possible de consulter la norme ISO-9555-2.

8.5.2.6 Préparation des traceurs

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

Préparation d'une solution mère de traceur chimique (chlorure de lithium)

La méthode de préparation d'une solution mère de chlorure de lithium peut être adaptée pour la préparation de tout traceur chimique. L'équation suivante est utilisée pour la préparation d'une solution de chlorure de lithium ayant une concentration donnée de traceur :

$$M_{sel} = C_{traceur} \times V \times \frac{MM_{sel}}{MM_{traceur}} \quad (37)$$

Où M_{sel} Masse du sel à peser (ex. : g/mol);
 $C_{traceur}$ Concentration du traceur (ex. : mg/l);

²⁹ United States Environmental Protection Agency.

V	Volume de solution requis (ex. : l);
MM_{sel}	Masse moléculaire du sel (ex. : g/mol);
$MM_{traceur}$	Masse moléculaire du traceur (ex. : g/mol).

Ainsi, pour préparer 10 litres d'une solution de 10 000 mg/l de lithium et compte tenu du fait que la masse moléculaire du traceur (LiCl) est de 42,392 g/mol et que la masse moléculaire du sel (Li) est de 6,939 g/mol, les valeurs connues sont placées dans l'équation précitée afin de déterminer la quantité de LiCl nécessaire à la préparation de la solution. L'équation devient alors :

$$M_{sel} = \frac{10\,000\,mg/l}{1\,000\,mg/l} \times 10\,l \times \frac{42,392\,g/mol}{6,939\,g/mol} = 610,9\,g \quad (38)$$

Préparation d'une solution mère et d'une solution étalon de colorant (rhodamine WT)

La méthode de préparation d'une solution de rhodamine WT peut être adaptée pour la préparation de tout traceur colorant.

La rhodamine WT est habituellement disponible en solution aqueuse à une concentration de 20 %. Ainsi, 1 microgramme de la solution 20 % dilué dans 1 litre d'eau contiendra 0,2 microgramme d'ingrédient actif. La relation entre la lecture obtenue d'un fluorimètre standard et la concentration en rhodamine WT est linéaire entre 0 et 500 ppb. En termes d'ingrédient actif, la linéarité se situe donc entre 0 et 100 ppb. Ces informations sont cruciales pour la détermination de l'intensité du pic de traceur désirée. En conséquence, pour éviter la confusion, il est primordial d'identifier les solutions mère et étalon en termes de solution traceur ou d'ingrédient actif.

La solution étalon se prépare en trois temps. D'abord, à partir de la solution originale (commerciale), il est possible de préparer une quantité déterminée de traceur à une concentration établie, selon la procédure suivante :

1. Préparation de la solution mère en laboratoire

Préparation d'une solution de 10 000 ppm de solution traceur :

Avec une balance de laboratoire, peser 1 g de la solution de rhodamine WT 20 % directement dans une fiole jaugée de 100 ml et la diluer à la marque avec de l'eau distillée. Cette solution possède une gravité spécifique de 1,002 g/ml permettant de poursuivre les dilutions suivantes par masse ou par volume.

2. Dilution de la solution mère en laboratoire

Préparation d'une solution de 100 ppm de solution traceur :

Pipetter 1 ml de la solution 1 dans une fiole jaugée de 100 ml et la diluer à la marque avec de l'eau distillée.

3. Dilution de la solution mère à l'aide de l'eau de l'écoulement

Préparation d'une solution de 500 ppb de solution traceur :

Pipetter 5 ml de la solution 2 dans une fiole jaugée de 1 000 ml et la diluer à la marque avec de l'eau de l'écoulement. La solution obtenue équivaut à 500 ppb de rhodamine WT 20 % ou à 100 ppb d'ingrédient actif.

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.

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.

8.5.3 Détermination de la quantité de traceur

8.5.3.1 Paramètres requis pour la détermination de la quantité de traceur

Pour déterminer la quantité de traceur nécessaire pour effectuer le travail, il est nécessaire de définir les quatre paramètres suivants :

- Concentration du traceur à l'injection (C_1);
- Concentration du traceur dilué (échantillon prélevé à la section d'échantillonnage (C_2));
- Débit estimé de l'effluent à mesurer (Q);
- Temps estimé de passage du traceur à la section d'échantillonnage ($t_f - t_i$).

Lors de l'utilisation de la méthode à débit constant, il faut aussi connaître :

- La durée de l'injection après l'atteinte du plateau (t_p).

Lorsque le débit est inconnu, diverses options sont envisageables pour l'estimer, notamment :

- Estimer la vitesse moyenne (à l'aide d'un flotteur) de la section mouillée;
- Utiliser les indications d'un ouvrage hydraulique voisin;
- Consulter la courbe d'étalonnage d'une station de jaugeage voisine;
- Etc.

Il est aussi pratique courante d'utiliser un colorant pour faire un essai préliminaire et de mesurer le temps de parcours basé sur l'effet visuel du mélange. Lorsqu'un traceur chimique est utilisé, l'ajout d'un colorant (si un tel ajout ne cause pas d'interférence) permet de visualiser le passage du traceur.

Le Tableau 41 présente d'autres paramètres à considérer pour la détermination de la quantité de traceur en fonction de la méthode de dilution appliquée (intégration ou à débit constant).

Tableau 41: Paramètres à considérer pour la détermination de la quantité de traceur

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>La concentration attendue du traceur après mélange avec l'écoulement (C_2) doit générer un signal facilement mesurable. Habituellement, une concentration supérieure de deux à cinq fois la concentration naturelle de l'écoulement est recherchée. Les teneurs maximales de traceur pouvant être tolérées par le milieu récepteur doivent être respectées³⁰. Lorsque le bruit de fond est élevé, un rapport inférieur (1/2 fois le bruit de fond) peut être acceptable pourvu que l'impact sur l'exactitude des résultats ne soit pas marqué.</p> <p>En général, plus la quantité de traceur injectée est grande, plus le pourcentage de récupération du traceur sera élevé. Plus la concentration du traceur à la section d'échantillonnage est supérieure à celle du bruit de fond, plus la mesure sera de qualité.</p>	<p>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 toute éventualité.</p> <p>Il est important que les concentrations du traceur atteignent un plateau stable. De même, un rapport élevé du signal plateau-bruit de fond est requis.</p> <p>Toutefois, lors de l'estimation de ce rapport, il faudra tenir compte des teneurs maximales de traceur pouvant être tolérées par le milieu récepteur³⁰.</p>

8.5.3.2 Équation pour déterminer la quantité de traceur

Une fois les valeurs des paramètres connus, il est possible d'évaluer la quantité de traceur requise à l'aide des équations présentées au Tableau 42.

³⁰ Critères d'eau de surface.

Tableau 42 : Équations pour déterminer la quantité de traceur

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
$V = \left[\frac{C_2}{C_1} Q^l (t_f - t_i) \right] 1000$ <p>où :</p> <p> V Quantité de traceur requise (ex. : ml); C_1 Concentration du traceur à l'injection (ex. : mg/l); C_2 Concentration du traceur après mélange avec l'écoulement (ex. : mg/l); Q^l Débit estimé (ex. : l/min); t_f Temps de fin de passage du traceur à la section d'échantillonnage (ex. : min); t_i Temps de début de passage du traceur à la section d'échantillonnage (ex. : min). </p>	$V = (t_f - t_i + t_p) \frac{Q^l C_2}{C_1}$ <p>où :</p> <p> V Quantité de traceur requise (ex. : l); C_1 Concentration du traceur à l'injection (ex. : mg/l); C_2 Concentration du traceur après mélange avec l'écoulement (ex. : mg/l); Q^l Débit estimé (ex. : l/min); t_f Temps de fin de passage du traceur à la section d'échantillonnage (ex. : min); t_i Temps de début de passage du traceur au point de contrôle (ex. : min); t_p Temps d'injection après que le plateau est atteint (ex. : min). </p>

Le traceur est ensuite préparé selon les méthodes décrites à la section 8.5.2.6.

8.5.4 Équipements nécessaires pour les travaux de terrain

Les équipements nécessaires pour les travaux de terrain des deux méthodes sont les suivants :

- 1 fiole jaugée de 1 litre pour mesurer l'eau du canal;
- 1 tasse à mesurer pour prélever l'eau du canal;
- 1 flacon laveur pour ajuster les niveaux d'eau dans la fiole;
- Des pipettes de 2, 5 et 10 ml pour mesurer les volumes de solution secondaire;
- 1 poire à pipetter;
- 1 seau pour réaliser l'étalonnage de l'instrument de mesure;
- 1 bouteille à gros goulot de 1 ou 2 litres pour mélanger la solution secondaire;
- 1 baguette d'agitation;
- 1 chronomètre;
- L'instrument de mesure du traceur et d'acquisition des données (si requis);
- Les bouteilles d'échantillonnage (au moins 30).

Pour l'utilisation de la méthode à débit constant, il est aussi nécessaire de prévoir :

- L'équipement d'injection à débit constant (siphon flotteur, pompe doseuse, vase de Mariotte, vase à niveau constant);

- 1 cylindre gradué de 100 ml pour mesurer le débit d'injection.

8.5.5 Injection du traceur

L'utilisateur doit 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 minime de la surface (de 5 à 8 cm), surtout lorsque l'opération se fait dans des endroits assez restreints, comme des regards d'égout.

Le Tableau 43 présente les autres recommandations à appliquer lors de l'injection du traceur en fonction de la méthode de dilution appliquée.

Tableau 43 : Recommandations à appliquer lors de l'injection du traceur

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>L'injection de la quantité totale de traceur préparé se fait de façon instantanée, au point d'injection du bief de mesurage, au centre de l'écoulement. L'injection se fait généralement à l'aide d'un contenant à très grande ouverture qui permet la vidange rapide de toute la solution.</p> <p>Le chronométrage doit débuter et les personnes à la section d'échantillonnage doivent être avisées que le traceur a été injecté.</p> <p>Lorsque le débit n'est pas mesuré en continu, il est recommandé, pour assurer la constance du débit, de mesurer et d'enregistrer la hauteur d'eau dans le bief de mesurage.</p>	<p>L'injection dans une chute est à proscrire.</p> <p>L'injection du traceur se fait de façon continue, à un débit et à une concentration connus, à l'aide d'un appareil dont le débit peut être ajusté et contrôlé.</p> <p>La tubulure d'injection ne doit pas toucher à la surface de l'eau; ainsi on évitera que le traceur ne soit entraîné par le courant d'eau et que le débit d'injection soit faussé.</p> <p>Il est requis de vérifier le débit d'injection avant et après l'utilisation de l'appareil pour valider que le débit est bien demeuré constant. Le débit d'injection s'établit en se basant sur la moyenne de trois mesures volumétriques.</p> <p>Aucune bulle d'air ne doit être présente dans le système d'injection pour que soit maintenue une présence continue de solution traçante dans la tubulure.</p> <p>Le traceur doit être placé 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.</p> <p>Le taux d'injection est une des variables cruciales du calcul de débit. Il est important de quantifier et de réduire au minimum sa variabilité.</p>

8.5.6 Prélèvement des échantillons

Les échantillons à prélever sont de deux natures : les échantillons de contrôle et les échantillons de mesure.

8.5.6.1 Échantillons de contrôle

Les échantillons de contrôle servent :

- À vérifier et à quantifier la présence naturelle du traceur dans l'écoulement (bruit de fond);
- À vérifier la constance ou les variations de concentration naturelle du traceur dans l'écoulement;
- À vérifier la concentration du traceur injecté.

Dans le cas de la méthode de dilution par intégration, les échantillons servent aussi à établir le taux de récupération du traceur.

Bruit de fond

Au moins trois séries de trois échantillons de l'eau de l'écoulement sont prélevées dans le bief de mesurage, dans le but de déterminer la concentration naturelle du traceur dans l'écoulement et de vérifier qu'il n'y a pas eu de variation de la concentration naturelle.

Ces prélèvements sont faits :

- Avant que la manipulation du traceur soit commencée;
- Au cours de l'essai;
- À la fin de l'injection.

Les échantillons doivent être prélevés à un endroit représentatif de la qualité de l'écoulement, sans risque de contamination par le traceur (ex. : en amont du bief de mesurage).

Concentration du traceur injecté (C_I)

Les spécifications en lien avec la détermination de la concentration du traceur injecté sont présentés au Tableau 44.

Tableau 44 : Détermination de la concentration du traceur injecté (C_1)

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>Trois échantillons d'environ 50 ml de la solution d'injection doivent être prélevés avant l'essai, pour la vérification de sa concentration et la préparation des étalons.</p> <p>C_1 correspond à la moyenne des trois échantillons.</p> <p>Les certificats d'analyse de tous les échantillons adéquatement identifiés doivent être joints en annexe du rapport.</p>	<p>Trois échantillons de la solution d'injection doivent être prélevés au début et trois autres à la fin de l'essai, pour la vérification de sa concentration. Le résultat moyen des six mesures est ensuite considéré comme la concentration du traceur injecté. Pour que l'essai soit valide, la différence entre chacune des six mesures doit être inférieure à 5 %.</p> <p>Les certificats d'analyse des six mesures doivent être joints en annexe du rapport.</p>

8.5.6.2 Échantillons de mesure

Les éléments à appliquer lors du prélèvement des échantillons sont présentés au Tableau 45.

Tableau 45 : Description des méthodes d'échantillonnage

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>Les échantillons de mesure sont prélevés à la section d'échantillonnage après l'injection du traceur. Ils servent à déterminer la concentration du traceur après mélange (C_2) et à établir la valeur de débit (Q) dans le bief de mesurage.</p> <p>L'échantillonnage doit couvrir la durée totale du passage du traceur. Il doit commencer avant que ce dernier n'arrive à la section d'échantillonnage et se poursuivre tant qu'il y a présence de traceur.</p> <p>Une grande quantité d'échantillons (minimum 30) est nécessaire pour vérifier que le traceur est complètement passé.</p> <p>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 à la section d'échantillonnage.</p>	<p>Les échantillons sont prélevés à la section d'échantillonnage après l'injection du traceur. Ils permettent de déterminer la concentration du traceur à la section d'échantillonnage.</p> <p>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.</p> <p>L'échantillonnage doit commencer avant que le traceur arrive à la section d'échantillonnage, et se poursuivre après que le plateau est atteint. Si un analyseur en continu est utilisé, il sera possible de vérifier que le plateau est atteint sur toute la largeur du canal. Une variation du signal le long de la largeur du canal sera une indication que la longueur de bon mélange n'est pas atteinte. Il est alors recommandé de déplacer l'équipement de mesure en aval.</p>

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>Par exemple, s'il est estimé que la concentration maximale atteindra la section d'échantillonnage 10 minutes après l'injection, l'échantillonnage doit se poursuivre après ces 10 minutes pour une période minimale de 30 minutes (idéalement 40 minutes).</p> <p>Les échantillons de mesure 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. Un débit rapide et un temps court de passage du traceur impliquent des prélèvements selon une fréquence plus courte (ex. : toutes les 10 secondes).</p>	<p>Les échantillons doivent être prélevés à un intervalle de temps court, 5 minutes au maximum après l'injection, et à toutes les minutes lorsque le plateau est atteint.</p> <p>Le temps exact de prélèvement doit être noté pour chacun des échantillons.</p>

Dans le cas de canaux larges, des échantillons doivent être prélevés simultanément en trois points, soit aux 1/6, 3/6 et 5/6 de la largeur du canal, lorsque :

- Le canal a plus de 2,4 m (8 pi) de largeur et possède des parois uniformes et homogènes (ex. : conduite en béton);
- Le canal a plus de 1,8 m (6 pi) de largeur et possède des parois uniformes, mais non homogènes (ex. : fossé).

Chaque échantillon doit être identifié et préparé immédiatement pour l'expédition au laboratoire. Les échantillons doivent être gardés hors des rayons directs du soleil, surtout lorsqu'il s'agit de traceurs photosensibles, comme les colorants.

Les certificats d'analyse de tous les échantillons doivent être joints en annexe du rapport.

8.5.7 Analyse des résultats

Habituellement, la concentration des échantillons est déterminée en laboratoire. Pour certains traceurs (colorant, sels, etc.), il peut être pratique de faire l'analyse sur le site, mais cette procédure n'est pas obligatoire. Dans un tel cas, les échantillons prélevés devraient préférablement être conservés pour référence ultérieure. Une deuxième analyse peut ainsi être faite pour contre-vérifier les résultats de la première analyse.

8.5.8 Interprétation des résultats

Une donnée peut être rejetée seulement si une justification statistique est fournie ou si une erreur systématique a été déterminée. Si tel est le cas, les justifications requises doivent être jointes au rapport. Le Tableau 46 décrit les éléments à considérer pour l'interprétation des résultats.

Tableau 46 : Interprétation des résultats

Méthode par intégration (injection instantanée)	Méthode à débit constant (injection en continu)
<p>Lorsque les échantillons sont prélevés en trois points (ex. : dans le cas des canaux larges), une courbe de la concentration en fonction du temps est tracée pour chaque point de prélèvement et l'aire sous chaque courbe est mesurée.</p> <p>Le mélange est considéré comme uniforme lorsque les aires sous les courbes sont semblables. Une courbe moyenne est ensuite tracée à partir de ces trois courbes.</p> <p>Lorsque les échantillons sont prélevés en un seul point, une courbe de la concentration en fonction du temps est aussi tracée, mais un seul plateau servira au calcul du débit.</p>	<p>Lorsque les échantillons sont prélevés en trois points (ex. : dans le cas des canaux larges), une ligne de la concentration en fonction du temps doit être tracée pour chaque point de prélèvement.</p> <p>Un plateau identique pour les trois lignes indique que le mélange est uniforme et que la durée d'injection est suffisante.</p> <p>La période d'injection du traceur doit être suffisante pour permettre la superposition des trois lignes, et seules les concentrations situées sur le plateau doivent servir au calcul du débit. La Figure 106 illustre l'effet de la durée du temps d'injection.</p> <p>L'équilibre (plateau) entre les trois points est rarement atteint au même moment, puisque les vitesses transversales d'écoulement sont différentes entre chaque point.</p> <p>La Figure 104 illustre la courbe dans le cas où les échantillons sont prélevés en un seul point.</p>

8.5.9 Pourcentage de récupération

Ce critère s'applique uniquement à la méthode par intégration.

Pour que l'essai avec la méthode par injection instantanée soit considéré comme valide, il faut que 95 % de la masse de traceur injectée soit récupérée.

Dans le cas des canaux larges où trois courbes doivent être tracées, le taux de récupération doit être vérifié individuellement pour chacune des courbes.

Le pourcentage de récupération du traceur doit être vérifié par la multiplication de l'aire sous la courbe de restitution « concentration-temps de passage » par le débit de l'écoulement obtenu. Alors, le pourcentage de récupération est donné par l'équation suivante :

$$\% P_{\text{rec.}} = \frac{M_{\text{rec.}}}{M_{\text{inj.}}} \times 100 \quad (39)$$

Où % $P_{\text{rec.}}$ Pourcentage de récupération;
 $M_{\text{rec.}}$ Masse de traceur récupérée;
 $M_{\text{inj.}}$ Masse de traceur injectée.

8.6 RÉALISATION D'UN ESSAI DE DILUTION (PAR INTÉGRATION OU À DÉBIT CONSTANT) À L'AIDE D'UN TRACEUR CHIMIQUE ET DE LA MESURE EN CONTINU DE LA CONDUCTIVITÉ

Cette section décrit les principes de base permettant la réalisation d'un essai à l'aide du traceur chimique NaCl injecté instantanément (8.6.1) ou en continu (8.6.2) et d'une sonde de mesure de la conductivité en continu.

Ces deux procédures considèrent qu'à de faibles concentrations, la conductivité électrique variera de façon linéaire en fonction de la concentration en sel (NaCl). La précision des procédures repose sur la dissolution complète de la quantité de sel utilisée.

Puisque la conductivité varie en fonction de la température, il est primordial d'utiliser une sonde de conductivité jumelée à une sonde de température dans le but de compenser cet effet.

8.6.1 Méthode par intégration (injection instantanée)

Les éléments impliqués sont :

- Le traceur chimique NaCl injecté instantanément;
- Une sonde de mesure de la conductivité en continu (jumelée à une sonde de température).

La réalisation de l'essai se déroule selon les étapes suivantes :

1. Préparer la solution d'injection.

La quantité de NaCl pouvant être facilement dissoute dans l'eau est estimée à environ 1 kg de sel par 5 litres d'eau. Cette solution n'a pas à être effectuée avec de l'eau de l'écoulement et peut être pré-mélangée au laboratoire. Une préparation à l'avance de cette solution permettra une meilleure dissolution du sel.

2. Choisir le point d'injection et le bief de mesurage.
3. Prélever un volume (X) connu de la solution d'injection puis le mélanger à un volume (V_o) connu d'eau de l'écoulement. Cette solution correspond à la solution secondaire.

Cette solution a une concentration relative équivalant à :

$$CR_{sec} = \frac{X}{V_o + X} \quad (40)$$

4. Mesurer de façon ponctuelle et noter la conductivité électrique (CE_{bf}) en amont du point d'injection et en aval de la section d'échantillonnage.

5. Installer la sonde de conductivité pour la mesure en continu. Commencer l'enregistrement des valeurs.
6. Injecter un volume (V) connu de la solution préparée de manière instantanée au point d'injection. La quantité injectée peut être estimée grâce à l'équation présentée à la section 8.5.3.2 (méthode par intégration).
7. Enregistrer les valeurs de la sonde de conductivité (CE_t) en fonction du temps et à intervalles réguliers jusqu'à ce qu'elles reviennent au niveau mesuré à l'étape 4. Si les valeurs ne reviennent pas au niveau mesuré en 4, on devra mesurer à nouveau la conductivité en amont du site d'injection pour vérifier si elle a fluctué.
8. Prélever un volume connu (V_c) d'eau de l'écoulement et le placer dans une chaudière. Installer cette chaudière dans l'écoulement pour conserver la température de l'eau dans la chaudière le plus près possible de celle du canal. Mesurer la conductivité de ce volume (CE_0) qui correspondra à $CR = 0$ (donc le 0 qui servira à établir k).
9. Déterminer la constante d'étalonnage k :

On détermine la constante k en traçant une courbe de la concentration relative (CR) en fonction de la conductivité électrique (CE).

À l'aide d'une pipette, ajouter dans la chaudière un volume connu de la solution secondaire préparée à l'étape 3. Mesurer la conductivité électrique (CE). Répéter cette étape (minimum 3 points) jusqu'à ce que la conductivité électrique dépasse le niveau de détection maximal attendu.

La conductivité relative de chaque point est déterminée grâce à l'équation suivante :

$$CR = \frac{CR_{sec} \sum y}{(V_c + \sum y)} \quad (41)$$

Où $\sum y$ Quantité totale de solution secondaire ajoutée dans la chaudière (ex. : ml).

Déterminer k (k correspondant à la pente du graphique de la concentration relative CR en fonction de la conductivité électrique CE).

10. Calculer le débit grâce à l'équation suivante :

$$Q = \frac{V}{K \Delta t \sum [CE(t) - CE_{bf}]} \quad (42)$$

Où	V	Volume de la solution d'injection (ex. : m ³);
	K	Constante d'étalonnage (ex. : cm/μS);
	Δt	Intervalle de temps entre chaque mesure (ex. : secondes);
	CE_t	Conductivité électrique de la progression du traceur (ex. : μS/cm);
	CE_{bf}	Conductivité électrique du bruit de fond (ex. : μS/cm).

11. Vérifier le taux de récupération du traceur.

8.6.2 Injection en continu

Cette procédure peut être adaptée à un traceur fluorescent.

Les éléments impliqués sont :

- Le traceur chimique NaCl injecté en continu;
- Une sonde de mesure de la conductivité en continu (jumelée à une sonde de température).

La réalisation de l'essai se déroule selon les étapes suivantes :

1. Préparer la solution d'injection.

La quantité de NaCl pouvant être facilement dissoute dans l'eau est estimée à environ 1 kg de sel par 5 litres d'eau. Cette solution n'a pas à être effectuée avec de l'eau de l'écoulement et peut être pré-mélangée au laboratoire. Une préparation à l'avance de cette solution permettra une meilleure dissolution du sel. Pour cette étape, la concentration de sel n'a pas à être mesurée très précisément puisque le résultat de l'essai sera exprimé en volume de traceur et non en masse.

2. Choisir le site d'injection et le bief de mesurage.

3. Prélever un volume X connu de la solution d'injection puis le mélanger à un volume V_0 connu d'eau du canal. Cette solution correspond à la solution secondaire.

Cette solution a une concentration relative équivalant à :

$$CR_{sec} = \frac{X}{V_0+X} \quad (43)$$

4. Mesurer de façon ponctuelle et noter la conductivité électrique en amont CE_{bf} du point d'injection et en aval de la section d'échantillonnage.

5. Installer la sonde de conductivité pour la mesure en continu. Commencer l'enregistrement des valeurs.

6. Installer l'équipement d'injection en continu. Commencer l'injection de la solution. La quantité injectée peut être estimée grâce à l'équation présentée à la section 8.5.3.2 (méthode à débit constant).

Parallèlement à l'injection, commencer les mesures à la section d'échantillonnage. Lorsque la conductivité électrique se stabilise (CE_s), vérifier à deux autres points sur la largeur du canal si la conductivité est égale. Si ce n'est pas le cas, éloigner la section d'échantillonnage vers l'aval pour obtenir une zone de bon mélange.

7. Mesurer le débit d'injection à au moins trois occasions pendant la procédure. Prélever une portion de la solution d'injection.
8. Prélever un volume connu (V_c) d'eau de l'écoulement et le placer dans une chaudière. Installer cette chaudière dans l'écoulement pour conserver la température de l'eau dans la chaudière le plus près possible de celle du canal. Mesurer la conductivité de ce volume (CE_0) qui correspondra à $CR = 0$ (donc le 0 qui servira à établir k).
9. Déterminer la constante d'étalonnage k :

On détermine la constante k en traçant une courbe de la concentration relative CR en fonction de la conductivité électrique (CE).

À l'aide d'une pipette, ajouter dans la chaudière un volume connu (dans le cas présent 2 ml) de la solution secondaire préparée à l'étape 3. Mesurer la conductivité électrique CE . Répéter cette étape (minimum 3 points) jusqu'à ce que la conductivité électrique dépasse le niveau de détection maximal attendu.

La conductivité relative de chaque point est déterminée grâce à l'équation suivante :

$$CR = \frac{CR_{sec} \sum y}{(V_c + \sum y)} \quad (44)$$

Où $\sum y$ Quantité totale de solution secondaire ajoutée dans la chaudière (ex. : ml).

Déterminer k (k correspondant à la pente du graphique de la concentration relative CR en fonction de la conductivité électrique CE).

10. Calculer le débit grâce à l'équation suivante :

$$Q = \frac{q}{K(CE_s - CE_{bf})} \quad (45)$$

Où	Q	Débit de l'écoulement à mesurer;
	q	Taux d'injection du traceur (ex. : l/s);
	K	Constante d'étalonnage (ex. : cm/ μ S);
	CE_s	Conductivité électrique stabilisée (ex. : μ S/cm);
	CE_{bf}	Conductivité électrique du bruit de fond (ex. : μ S/cm).

8.7 EXEMPLES (POUR LES DEUX MÉTHODES)

Des exemples sont présentés dans l'article de Dan Moore, intitulé « Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement » (*Watershed Management Bulletin*).

8.8 CAUSES D'ERREUR DE LA MÉTHODE DE DILUTION D'UN TRACEUR

Comme décrit dans la norme ISO 9555-1:1994, le débit est calculé à partir de la dilution d'une quantité donnée de traceur, et l'incertitude sur le mesurage est la fourchette dans laquelle se trouve le débit exact, avec 95 % de probabilité.

Dans les conditions normales, l'erreur de mesure de la méthode par dilution est de ± 2 à 10 %.

Les sources d'erreur systématiques dans le cas de la méthode de dilution par intégration et à débit constant portent sur les éléments suivants :

- Erreur liée au traceur;
- Erreur liée à la durée de l'essai;
- Erreur liée à un mauvais mélange dans le bief de mesurage;
- Erreur liée à une variation du volume d'eau dans le bief;
- Erreur liée à l'échantillonnage et à l'analyse des échantillons.

Bien que ce ne soit pas toujours le cas, l'erreur systématique aura tendance à surestimer le débit. La réduction des erreurs systématiques étant beaucoup plus difficile que celle des erreurs aléatoires, le lecteur est invité à consulter la norme ISO 9555-1:1994 afin de prendre connaissance des hypothèses sur la distribution de ces erreurs.

Les sections suivantes résument les points à vérifier afin que soient réduites au minimum les erreurs de manipulation lors de l'application de chaque méthode.

Méthode de dilution par intégration (injection instantanée)

- 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 traçante avant l'injection;
- La contamination des récipients d'échantillonnage;

- La variation du débit de l'écoulement en cours de mesure.

Des erreurs peuvent survenir lors des prélèvements requis pour la préparation des solutions d'injection et des standards. Ces erreurs doivent être réduites au minimum par l'utilisation de fioles jaugées et de pipettes de verre appropriées. Une pipette dont le volume se situe le plus près possible du volume recherché devrait être utilisée.

L'exactitude du calcul du débit est directement liée à l'exactitude du volume injecté. Une attention particulière devrait être apportée lors du mesurage de ce volume.

Une seconde incertitude est générée par l'appareil de mesure du temps. Si un chronomètre numérique est utilisé adéquatement, cette incertitude devrait être très petite par rapport aux autres sources d'incertitude.

Enfin, une autre source d'imprécision provient de la différence entre la mesure de la concentration du traceur injecté et la concentration mesurée dans l'échantillon. L'incertitude attribuée à l'appareil de mesure appliquée sur un écart faible entre ces deux valeurs (concentration traceur injecté et concentration mesurée dans l'échantillon) générera un pourcentage d'incertitude élevé. Cette erreur peut être réduite au minimum par l'injection d'une solution plus concentrée et par l'utilisation de la méthode des dilutions étalons.

La norme ISO 9555-1:1994 décrit une méthode d'estimation statistique des erreurs aléatoires attribuables à la méthode d'injection instantanée. Le calcul de l'incertitude sur le débit nécessite la connaissance des incertitudes types sur le volume (V), le temps de parcours (T_p) et le facteur de dilution ($C_1/\bar{C}_2 = D_i$).

$$\sigma(Q) = \sqrt{\sigma(V)^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^2 + \sigma(T_p)^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial T_p}\right)^2 + \sigma(D_i)^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial D_i}\right)^2} \quad (46)$$

Le facteur de dilution peut être résolu par la méthode des dilutions étalons. Cette méthode n'est pas présentée dans ce document et le lecteur est invité à consulter la section 6.3 de la norme ISO 9555-1:1994 afin de se familiariser avec celle-ci.

Méthode de dilution à débit constant (en continu)

- La concentration de la solution mère;
- Le mélange adéquat de la solution traçante avec l'effluent;
- La dégradation de la solution traçante en cours d'injection;
- La dégradation de la solution traçante au contact avec l'écoulement;
- L'instabilité du débit d'injection;
- La perte de solution traçante au point d'injection;
- Les écarts importants entre les concentrations situées sur le plateau de la courbe.

Des erreurs peuvent survenir lors des prélèvements requis pour la préparation des solutions d'injection et des standards. Ces erreurs doivent être réduites au minimum par l'utilisation de fioles jaugées et de pipettes de verre appropriées. Une pipette dont le volume se situe le plus près possible du volume recherché devrait être utilisée.

L'exactitude du calcul du débit est directement liée à la précision du débit d'injection. Une attention particulière devrait être apportée lors de l'évaluation de ce débit.

Une autre source d'imprécision provient de la différence entre la mesure du bruit de fond et celle du plateau. L'incertitude attribuée à l'appareil de mesure appliquée sur un écart faible entre ces deux valeurs générera un pourcentage d'incertitude élevé. On peut diminuer cette erreur en injectant une solution plus concentrée tout en réduisant au minimum l'impact sur le milieu.

La norme ISO 9555-1:1994 décrit une méthode d'estimation statistique des erreurs aléatoires attribuables à la méthode d'injection par débit constant. Le calcul de l'incertitude sur le débit nécessite la connaissance des incertitudes types sur le débit d'injection (q) et le facteur de dilution ($C_1/C_2 = D_i$). Le facteur de dilution peut être résolu par la méthode des dilutions étalons. Cette méthode sort du cadre du présent document, et le lecteur est invité à consulter la section 6.3 de la norme ISO 9555-1:1994 afin de se familiariser avec celle-ci.

$$\partial(Q) = \sqrt{\partial(q)^2 \left(\frac{\partial q}{\partial q}\right)^2 + \partial(D_i)^2 \left(\frac{\partial q}{\partial D_i}\right)^2} \quad (47)$$

8.9 UTILISATION DE LA MÉTHODE DE DILUTION D'UN TRACEUR EN TANT QUE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit *in situ*, la méthode de dilution d'un traceur est utilisée en tant que méthode de référence. La valeur de débit ainsi mesurée sera comparée avec la mesure simultanée du débit *in situ* (par le système de mesure en vérification) pour calculer l'écart entre ces deux valeurs de débit, et ainsi valider que l'écart maximal toléré (ex. : par un règlement) est respecté.

Trois essais sont requis et l'écart maximal toléré doit être respecté pour chaque essai et non pour la moyenne des essais. S'il est possible de procéder à des essais à trois niveaux de débit (min – moy – max de l'intervalle de mesure du système de mesure de débit *in situ*), un seul essai peut-être réalisé par niveau de débit si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, il peut être requis de procéder à trois essais pour un des niveaux de débit afin de valider le résultat obtenu.

Pour procéder adéquatement à la vérification de l'exactitude, il est requis d'appliquer les éléments décrits à la section 6 du présent document. De plus, la section 12 décrit les précisions relatives au rapport à produire afin qu'il soit complet.

Dilution d'un traceur...



Méthode de référence dont le principe repose sur la variation de la concentration d'un traceur entre son lieu d'injection et de prélèvement, et la conservation de la masse dudit traceur entre ces deux points.

Les traceurs se répartissent en trois catégories : chimique, colorant (fluorescent) et radioactif.

La longueur et les caractéristiques du bief de mesurage sont primordiales pour l'obtention d'une mesure représentative.

Les échantillons à prélever sont de deux natures : échantillons de contrôle et échantillons de mesure.

L'annexe 5 présente un exemple de grille terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit à l'aide de cette méthode.

9 MÉTHODE VOLUMÉTRIQUE

La méthode volumétrique peut se faire soit par la pesée d'un liquide recueilli pendant un laps de temps donné (aussi nommée méthode gravimétrique), soit par la mesure d'un volume d'un liquide écoulé pendant une période déterminée (aussi appelée méthode par capacité, méthode par capacité jaugée, méthode capacitive, méthode par empotement, méthode au seau ou encore méthode du volume chronométré). Ainsi, deux principes sont utilisés pour mesurer la quantité de liquide recueilli dans le récipient : la masse ou le volume.

Lorsque les conditions d'application le permettent, la méthode volumétrique représente celle à privilégier pour l'obtention d'une mesure ponctuelle, étant donné sa simplicité, sa rapidité, son faible coût ainsi que sa précision. Elle s'applique aux mesures ponctuelles de débit ou de volume d'eau dans les conduites découvertes ou fermées. Elle peut servir, par exemple, à mesurer le débit d'un écoulement ou à vérifier l'exactitude d'un système de mesure du débit.

Étant donné les contraintes logistiques (capacité du récipient), cette méthode est toutefois adaptée à la mesure de faibles débits.

Cette méthode peut permettre d'établir une mesure de débit indépendante qui sera utilisée en tant que méthode de référence dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit.

9.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Différentes procédures peuvent être utilisées pour l'application de la méthode volumétrique :

- Calculer le temps requis pour remplir un récipient quelconque (ex. : seau, sac de plastique) et évaluer, par la suite, la quantité de liquide récupérée par la mesure de son volume (ex. : cylindre gradué) ou de sa masse (ex. : pesée sur balance);
- Calculer le temps requis pour remplir un récipient dont le volume est connu avec précision (ex. : récipient de 20 l);
- Dans le cas de plus grands débits, utiliser un récipient de forme régulière et de dimension connue permettant de déterminer le volume à tous les niveaux pendant la vidange (ex. : réacteur biologique séquentiel, poste de pompage) ou le remplissage (ex. : réservoir). Par la suite, chronométrer le temps requis pour faire varier le niveau d'eau entre le niveau initial et le niveau final.

L'équation suivante traduit la relation entre le débit, le volume et le temps :

$$Q = \frac{V}{t} \quad (48)$$

Où Q Débit (ex. : m^3/s ou l/s);
 V Volume (ex. : m^3 ou l);
 t Temps de vidange ou de remplissage (ex. : secondes).

9.2 REMPLISSAGE ET VIDANGE DU RÉCIPIENT

Le procédé le plus couramment utilisé pour le remplissage d'un récipient est de le placer sous une chute libre, par exemple à la sortie d'une conduite, d'un ponceau ou d'un déversoir.

L'écoulement à mesurer doit être recueilli en totalité dans le récipient. S'il n'y a pas de chute ou que l'écoulement est trop étendu, on doit aménager le site de mesure (Figure 108), en veillant à ce que le dispositif de guidage n'influence pas l'élément primaire, particulièrement en occasionnant une remontée du niveau de l'eau en amont.

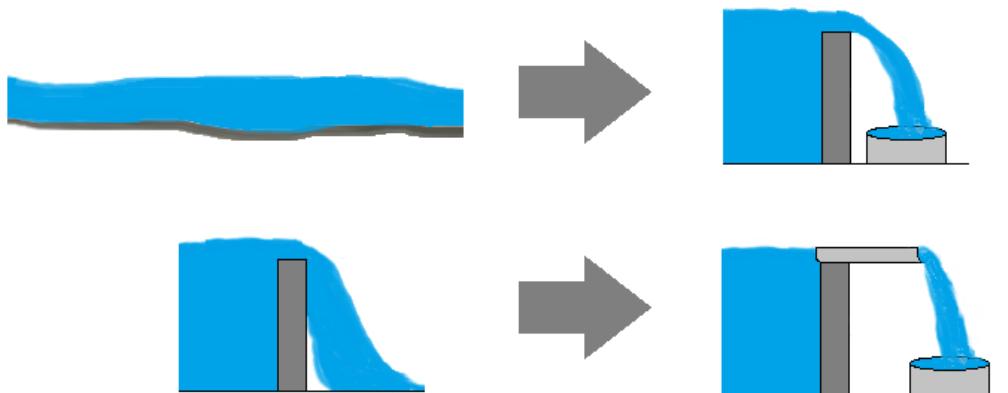


Figure 108 : Exemples d'aménagement de la section de mesure visant à limiter l'étendue de l'écoulement (haut) et exemple de dispositif de guidage du jet (bas)

Bien qu'il soit plus commun d'appliquer la méthode volumétrique en procédant au remplissage d'un récipient, il est aussi possible de l'appliquer à la vidange de ce dernier (ex. : utilisation d'un réacteur biologique séquentiel [RBS], poste de pompage). Toutefois, la même méthode, c'est-à-dire en remplissage ou en vidange, doit être utilisée pour chacun des essais. Il n'est donc pas approprié d'alterner le remplissage et la vidange.

Le récipient doit être complètement vidé et égoutté entre chaque remplissage.

Cette méthode peut s'appliquer à une conduite fermée sous pression, par exemple par le remplissage d'un camion-citerne (ex. : procédure par pesée) ou d'une cuve (ex. : procédure par volume ou pesée). Pour plus de détails sur l'application en conduite fermée, il est recommandé de consulter les normes ISO 4185 (méthode par pesée) et ISO 8316 (méthode par jaugeage d'un réservoir volumétrique).

9.3 DÉTERMINATION DU VOLUME D'EAU

La méthode volumétrique permet d'obtenir la valeur moyenne du débit pendant la durée de l'essai. Dans le cas particulier d'une vérification de l'exactitude, la comparaison devrait être faite entre le volume mesuré par la méthode volumétrique et le volume totalisé par l'équipement de mesure *in situ* au cours de l'essai (ex. : débitmètre installé sur un élément primaire), comme présenté dans l'exemple du Tableau 47.

Tableau 47 : Exemple – Comparaison des volumes totalisés au cours des trois essais par la méthode volumétrique et par le système de mesure *in situ*

Essai	Durée essai (minutes)	Volume totalisé (m ³)		Écart (%)
		Méthode volumétrique	Système de mesure <i>in situ</i> (ex. : débitmètre et canal Parshall)	
1	5	50	48	4,0
2	5	51	48	5,6
3	5	50	49	2,0

En l'absence d'un totalisateur, le volume du système de mesure *in situ* peut être obtenu en procédant à la moyenne des débits instantanés sur la durée de l'essai. Un écoulement variable implique qu'un plus grand nombre de débits instantanés soient notés au cours de l'essai pour augmenter l'exactitude.

L'exemple du Tableau 48 démontre que l'écart obtenu entre le débit d'essai (volumétrique) et le débit *in situ* est plus important (5,6 %) lorsque le débit moyen *in situ* est constitué à partir d'une valeur de débit instantané par minute, comparativement à l'exemple du Tableau 49, où une valeur de débit instantané toutes les 15 secondes est utilisée (1,4 %).

Un plus grand nombre de débits instantanés permet donc de constituer une moyenne plus représentative des variations d'écoulement survenues au cours de l'essai et se rapproche davantage de la valeur obtenue par l'essai volumétrique. Ce qui est vrai autant pour une vérification de l'exactitude que pour une simple mesure ponctuelle du débit d'un effluent.

Tableau 48 : Exemple – Comparaison du volume totalisé par la méthode volumétrique avec la moyenne des débits instantanés (1 donnée par minute) pendant une période de 5 minutes

Essai	Temps (H:M:S)	Système de mesure <i>in situ</i>			Méthode volumétrique	Écart (%)
		Débit instantané (m ³ /min)	Débit moyen (m ³ /min)	Volume totalisé (m ³)		
1	09:00:00	110	111,3 m ³ /min x 5 min = 556,7	590	5,6	
	09:01:00	111				
	09:02:00	112				
	09:03:00	112				
	09:04:00	112				
	09:05:00	111				

Tableau 49 : Exemple – Comparaison du volume totalisé par la méthode volumétrique avec la moyenne des débits instantanés (1 donnée toutes les 15 secondes) pendant une période de 5 minutes

Essai	Temps (H:M:S)	Système de mesure <i>in situ</i>			Méthode volumétrique	Écart (%)
		Débit instantané (m ³ /min)	Débit moyen (m ³ /min)	Volume totalisé (m ³)		
1	09:00:00	110	119,7 m ³ /min x 5 min = 598,3	119,7	590	1,4
	09:00:15	145				
	09:00:30	110				
	09:00:45	125				
	09:01:00	111				
	09:01:15	130				
	09:01:30	118				
	09:01:45	110				
	09:02:00	112				
	09:02:15	155				
	09:02:30	125				
	09:02:45	129				
	09:03:00	112				
	09:03:15	117				
	09:03:30	112				
	09:03:45	134				
	09:04:00	112				
	09:04:15	115				
	09:04:30	112				
	09:04:45	108				
	09:05:00	111				

9.4 DURÉE DES ESSAIS

L’application de la méthode volumétrique implique la mesure du volume cumulé pendant une période de temps déterminée, ou encore la mesure du temps nécessaire pour cumuler un volume déterminé, par exemple :

- Remplir un récipient gradué pendant une période de 2 minutes et noter le volume totalisé;
- Calculer le temps nécessaire pour remplir un récipient de 20 litres.

Dans tous les cas, le calcul du temps se fait à l’aide d’un chronomètre capable de lire au moins 1/100 secondes (0,01 %).

La durée de chaque essai dépend du débit de l'écoulement à mesurer. Pour de très faibles débits ($\leq 2 \text{ l/s}$), la durée minimale est de 10 secondes, et idéalement de 20 secondes, ce qui permet l'utilisation d'un récipient de 20 à 40 litres.

Dans le cas de grands débits mesurés par la vidange ou le remplissage d'un réservoir, un différentiel de hauteur d'eau minimale de 150 mm est requis.

Pour les débits intermédiaires, la durée de chaque essai doit permettre d'avoir une erreur de mesure négligeable, et une durée minimale de 5 minutes est donc recommandée.

L'utilisation de la méthode gravimétrique (par pesée du liquide) implique habituellement la présence d'un grand débit et des essais d'une durée d'au moins 5 minutes.

Les déclenchements de départ et de fin du chronomètre doivent correspondre avec précision respectivement au début et à la fin du recueil du volume d'eau.

9.5 NOMBRE D'ESSAIS

Plus le nombre d'essais est élevé, plus les résultats auront un poids statistique et plus la valeur de référence construite aura de pertinence.

Dans tous les cas, la méthode nécessite de réaliser minimalement trois essais. De plus, dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit *in situ*, l'écart maximal toléré doit être respecté pour chacun des essais.

L'exemple présenté dans le Tableau 50 illustre une vérification de l'exactitude où le troisième essai présente un écart supérieur à l'écart maximal toléré de 10 %, ce qui nécessite de procéder à un quatrième essai.

Tableau 50 : Exemple d'un essai présentant un écart supérieur à 10 % et nécessitant un essai supplémentaire

Essai	Volume essai (m ³)	Volume <i>in situ</i> (m ³)	Écart (%)
1	53	50	5,66
2	52	50	3,85
3	56	48	14,29
4	50	48	4,0

9.6 TYPE DE RÉCIPIENT

Le type, le volume et la forme du récipient doivent être adaptés aux conditions particulières de mesure. Il est donc possible d'utiliser des types de récipients très divers comme des seaux, des bacs, des sacs de plastique, des réservoirs, des camions-citernes, un poste de pompage, une

unité de traitement (ex. : réacteur biologique séquentiel, clarificateur primaire), etc. Le récipient doit toutefois posséder certaines propriétés :

- Dimensions connues avec précision, idéalement un récipient étalonné;
- Indéformable;
- Permettant un remplissage sans formation de trous d'air;
- Favorisant une vidange complète et rapide.

9.7 VOLUME DU RÉCIPIENT

Le volume du récipient est fonction du débit de l'écoulement à mesurer et sa capacité doit être déterminée précisément. De plus, le récipient dans lequel le liquide s'écoule pendant la durée de l'essai doit avoir une capacité suffisante afin que l'erreur commise sur le temps et les niveaux soit négligeable.

Différentes façons permettent d'établir le volume du récipient, par exemple :

- Utilisation d'un récipient gradué et étalonné, accompagné d'un certificat d'étalonnage;
- Étalonnage du récipient par pesée, à l'aide d'une balance étalonnée annuellement et accompagnée d'un certificat d'étalonnage;
- Mesurage des dimensions précises du récipient, et reproduction en détail sur un schéma;
- Dans le cas d'un grand réservoir fixe (ex. : poste de pompage, réacteur biologique séquentiel), utilisation d'un plan précis des dimensions (ex. : plan tel que construit) ou mesurage de chaque section à l'aide d'un laser lors d'un entretien du réservoir.

Lorsque les dimensions du récipient ou d'un réservoir doivent être mesurées, un grand nombre de mesures doit être fait pour tenir compte de toutes les irrégularités (ex. : parois inclinées, déformations, dépôts sur les parois ou au fond, présence de pompes ou tuyaux, etc.).

Les irrégularités ainsi que les éléments à retrancher doivent effectivement être considérés dans l'établissement du volume. Comme présenté à la Figure 109, un volume de 2 m^3 est à retrancher du volume de 12 m^3 du réservoir rectangulaire, pour un volume réel de 10 m^3 .

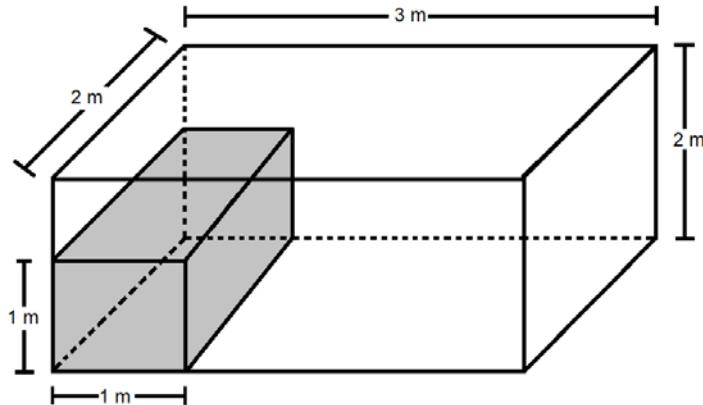


Figure 109 : Exemple de réservoir rectangulaire présentant un volume à retrancher

On doit valider la capacité du récipient préalablement aux essais afin de s'assurer que les dimensions d'origine (ex. : plan tel que construit) sont toujours valides (ex. : déformations, dépôts, ajout d'éléments à retrancher tels que pompe, tuyau, plaque de métal, etc.).

Comme mentionné précédemment, le matériau constituant le réservoir doit être suffisamment solide pour que les parois demeurent stables pendant les essais.

Généralement, plus le contenant est grand et plus la durée de l'essai est longue, plus le résultat est précis. Pour de très petits débits, un récipient de 5 à 40 litres peut être adéquat, à la condition que le contenant soit suffisamment grand pour permettre des essais d'une durée d'au moins 10 secondes, et idéalement de 20 secondes. Le Tableau 51 présente quelques exemples de volumes de récipients en fonction du débit de l'écoulement, pour des durées d'essai de 10 et 20 secondes.

Tableau 51 : Exemples de volumes de récipients en fonction du débit de l'écoulement

Débit		Durée de l'essai	
		10 secondes	20 secondes
l/s	m^3/s	Volume minimal (l)	
0,5	0,0005	5	10
1	0,001	10	20
2	0,002	20	40

9.8 MESURE DU NIVEAU D'EAU

Différents dispositifs de repérage du niveau peuvent être utilisés en fonction de l'installation ou du volume à mesurer, par exemple :

- Un récipient gradué;

- Un télémètre laser ou une règle graduée fixée à la paroi d'un récipient, permettant de mesurer la hauteur du niveau d'eau à partir du plan de référence inférieur ou supérieur;
- Un tube de niveau auquel est associée une réglette graduée, permettant de repérer des niveaux par le principe des vases communicants;
- Une jauge de niveau (ex. : flotte de niveau, etc.);
- Une sonde de mesure de niveau (ex. : sonde ultrasonique, sonde de pression, bulle à bulle, etc.).

L'exactitude de la mesure du niveau d'eau augmente lorsque la variation de hauteur d'eau au cours de l'essai augmente.

9.9 DÉTERMINATION DE LA MASSE DU LIQUIDE

Lors de l'utilisation de la pesée, la masse du liquide recueilli pendant une période de temps chronométrée doit être déterminée. La balance utilisée doit avoir fait l'objet d'un étalonnage au cours des 12 derniers mois pour lequel un certificat d'étalonnage est délivré.

La vidange complète du récipient est requise après chaque essai. Pour que la mesure soit plus précise, la pesée du récipient vide doit aussi être faite avant chaque essai (ex. : la pesée d'un camion-citerne doit être effectuée après chaque vidange).

9.10 DÉTERMINATION DU VOLUME MASSIQUE DU LIQUIDE

Pour établir le volume à la suite de la pesée, la masse du liquide pesé (ex. : kg) est multipliée par la masse volumique de ce liquide.

Tableau 52 : Exemple – Méthode volumétrique utilisant la pesée

Informations recueillies lors de l'essai	
Masse du camion-citerne vide	10 000 kg
Masse du camion-citerne rempli	12 000 kg
Masse du liquide recueilli au cours de l'essai	2 000 kg
Durée de remplissage du camion-citerne	5 minutes
Masse volumique du liquide recueilli	1 000 kg/m ³ ³¹

L'équation à appliquer pour l'obtention du volume du liquide pesé est la suivante :

³¹ Masse volumique de l'eau. Dans le cas d'un liquide présentant des caractéristiques différentes de l'eau, la masse volumique de ce liquide doit être utilisée.

$$\mathbf{Volume} = \frac{\mathbf{masse}}{\mathbf{masse volumique}} \quad (49)$$

Selon l'exemple présenté dans le Tableau 52, l'équation devient donc :

$$\mathbf{Volume} = \frac{2\,000\,kg}{1\,000\,kg/m^3} = 2\,m^3 \quad (50)$$

La conversion de ce volume totalisé au cours de l'essai en débit est obtenue ainsi :

$$\mathbf{Débit} = \frac{\mathbf{volume}}{\mathbf{durée de l'essai}} = \frac{2\,m^3}{5\,\text{minutes}} = 0,4\,m^3/min \quad (51)$$

9.11 CAUSES D'ERREUR DE LA MÉTHODE VOLUMÉTRIQUE

En fonction du contexte dans lequel la méthode volumétrique est appliquée, l'erreur de mesure peut varier de 1 à 10 %. L'exactitude de la mesure est d'autant meilleure que la durée des essais est longue.

Les sources d'erreur sont principalement reliées à la précision de la mesure du volume du récipient, de la pesée du liquide recueilli et de la durée de l'essai, mais elles peuvent être réduites au point de devenir négligeables :

- Erreurs dues à la détermination du volume du récipient :
 - Erreur dans la dimension du récipient;
 - Déformation, irrégularité, présence de dépôts sur le fond et les parois;
 - Fuite, apport d'eau parasite, absorption de liquide par les parois;
 - Élément à retrancher (ex. : pompe, tuyau);
- Erreurs dues à la mesure du niveau d'eau :
 - Imprécision de la lecture des hauteurs d'eau;
 - Imperfections de la graduation ou du positionnement de l'instrument de mesure;
 - Dérive de l'ajustement de la sonde de mesure de niveau;
- Erreurs dues au calcul du temps :
 - Résolution inadéquate du chronomètre;
 - Décalage entre le démarrage/arrêt du chronomètre lors du remplissage ou de la vidange;
- Erreurs dues à la détermination de la masse volumique;
- Erreurs dues à la méthode :
 - Écoulement à mesurer non recueilli en totalité;
 - Vidange incomplète du récipient entre chacun des essais;
 - Durée ou nombre d'essais inadéquat;

- Fréquence insuffisante des débits instantanés considérés pour établir une moyenne de débit *in situ*.

9.12 UTILISATION DE LA MÉTHODE VOLUMÉTRIQUE EN TANT QUE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit *in situ*, la méthode volumétrique est utilisée en tant que méthode de référence. La valeur de débit ainsi mesurée sera comparée avec la mesure simultanée du débit *in situ* (par le système de mesure en vérification) pour le calcul de l'écart entre ces deux valeurs de débit. On sera ainsi en mesure de valider que l'écart maximal toléré (ex. : par un règlement) est bien respecté.

Trois essais sont requis et l'écart maximal toléré doit être respecté pour chaque essai et non pour la moyenne des essais. S'il est possible de procéder à des essais à trois niveaux de débit (min – moy – max de l'intervalle de mesure du système de mesure de débit *in situ*), un seul essai peut-être réalisé par niveau de débit si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, il peut être requis de procéder à trois essais pour un des niveaux de débit afin de valider le résultat obtenu.

Pour procéder adéquatement à la vérification de l'exactitude, il est requis d'appliquer les éléments décrits à la section 6 du présent document. De plus, la section 12 décrit les précisions relatives au rapport à produire afin qu'il soit complet.

Méthode volumétrique...

Applicable aux mesures ponctuelles de débit ou de volume d'eau dans les conduites ouvertes ou fermées.

S'effectue selon différentes procédures basées sur le calcul du temps :

- pour remplir un récipient dont la quantité de liquide récupérée est évaluée par la mesure de son volume ou de son poids;
- pour remplir un récipient dont le volume est connu avec précision;
- pour la variation du niveau d'eau pendant le remplissage ou la vidange d'un récipient de forme régulière et de dimension connue.

Durée de chacun des trois essais :

- petit débit ($< 2 \text{ l/s}$) = 10-20 secondes pour $Q \leq 2 \text{ l/s}$
- débit intermédiaire ou méthode gravimétrique = idéalement 5 minutes
- grand débit (réservoir) = 5 minutes et Δh d'eau de 150 mm

L'annexe 5 présente un exemple de grille terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit à l'aide de cette méthode.



10 MÉTHODE UTILISANT LA CAPACITÉ D'UNE POMPE D'UN POSTE DE POMPAGE

10.1 DESCRIPTION D'UN POSTE DE POMPAGE

Un poste de pompage (aussi nommé station de pompage) est le lieu physique où se trouvent la ou les pompes de refoulement ou de relèvement destinées à acheminer des eaux vers un autre endroit ou équipement.

Un poste de pompage n'est pas un instrument de mesure, mais un ouvrage dont la connaissance des données de fonctionnement et des données structurelles permet d'obtenir une mesure indirecte et ponctuelle du débit transitant par le poste de pompage.

Cette méthode permet d'établir une mesure de débit indépendante qui sera utilisée en tant que méthode de référence dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit si :

- La capacité de la pompe est connue (détermination selon la méthode décrite à la section 5);
- La pompe fonctionne à vitesse constante;
- La méthode appliquée respecte les conditions d'utilisation décrites dans la présente section.

10.2 AMÉNAGEMENTS POSSIBLES D'UN POSTE DE POMPAGE

Les configurations des postes de pompage sont multiples. La première distinction se fait par rapport à la séquence de remplissage et de vidange d'un poste de pompage.

Ce dernier peut être isolé, c'est-à-dire lorsque le remplissage et la vidange d'un poste de pompage se font de façon distincte, ou non isolé, lorsque le remplissage et la vidange d'un poste de pompage se font plutôt simultanément.

Le nombre de pompes ainsi que le mode de fonctionnement de chacune constituent aussi d'autres caractéristiques d'aménagement. Les pompes peuvent fonctionner en alternance, simultanément ou encore de façon séquentielle (ex. : début du fonctionnement de la deuxième pompe lorsqu'un certain niveau d'eau est atteint).

La Figure 110 présente, de façon schématisée, les différents aménagements d'un poste de pompage.

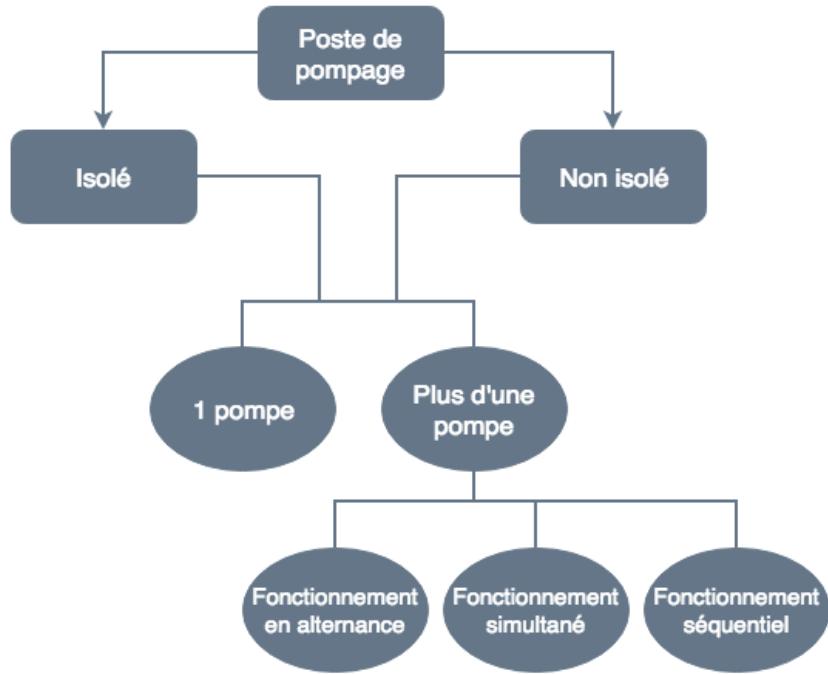


Figure 110 : Aménagements possibles d'un poste de pompage

10.3 DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURE DU DÉBIT IMPLIQUANT UN POSTE DE POMPAGE

Deux méthodes permettent le calcul du débit transitant par un poste de pompage, soit en déterminant :

- Le débit entrant dans le poste de pompage à partir des horodatages marche/arrêt des pompes et du suivi de la mesure de niveau d'eau, par la méthode volumétrique;
- Le débit sortant à partir du temps de fonctionnement de la pompe, par la méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage.

La présente section porte sur la mesure du débit sortant à partir du temps de fonctionnement de la pompe et non sur la méthode volumétrique, dont l'application est décrite en détail à la section 9.

10.4 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE UTILISANT LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Cette méthode utilise la capacité réelle de la pompe en relation avec son temps de fonctionnement pour calculer le volume d'eau sortant d'un poste de pompage, selon l'équation suivante :

$$V = Q_p t \quad (52)$$

Où V Volume d'eau (ex. : m^3);
 Q_p Capacité de la pompe (ex. : m^3/min);
 t Temps de la vidange (ex. : min).

Dans tous les cas, le calcul du temps de la vidange se fait à l'aide d'un chronomètre capable de lire (résolution) au moins 1/100 secondes (0,01 %).

La totalisation mesurée par la pompe doit correspondre avec précision aux déclenchements de départ et de fin du chronomètre, lorsque la pompe fonctionne au maximum de sa capacité.

Un exemple de calcul est présenté dans le Tableau 53.

Tableau 53 : Mesure du volume sortant à partir de la capacité de la pompe et du temps de la vidange

Capacité de la pompe (Q_p)	150 m ³ /min
Temps de la vidange (t)	30 min
Volume d'eau (V)	$V = 150 \text{ m}^3/\text{min} \times 30 \text{ min}$ $V = 4\,500 \text{ m}^3$

10.5 CONDITIONS D'APPLICATION DE LA MÉTHODE UTILISANT LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

10.5.1 Informations sur le poste de pompage

Lorsque la capacité de la pompe est utilisée pour établir un débit ponctuel ou en tant que méthode de référence pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit, les renseignements suivants doivent être vérifiés et notés :

- Le type de poste de pompage (ex. : humide ou sec, isolé ou non isolé);
- Le nombre de pompes et le mode de fonctionnement (en alternance, séquentiel, simultané);
- La localisation des pompages (ex. : intérieur ou extérieur du poste de pompage);
- Le numéro de série de la pompe;
- Les spécifications techniques théoriques de la pompe (ex. : capacité d'origine);
- La capacité réelle de la pompe selon le mode utilisé (ex. : isolé ou combiné) et la méthode utilisée pour la déterminer (description de la méthode et données brutes);
- 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 poste de pompage;
- L'existence de conduites submergées alimentant le poste de pompage;
- La présence et l'état des clapets de retenue.

10.5.2 Détermination de la capacité de la pompe (Q_p)

Avant de procéder aux essais, on doit déterminer la capacité réelle de la pompe (Q_p) sur la base de la méthode des conditions décrites à la section 5.

10.5.3 Durée des essais

La précision d'un essai augmente en fonction de sa durée. Idéalement, l'essai devrait être le plus long possible selon les caractéristiques du poste de pompage. La durée des essais peut être très variable en fonction des différences entre les postes de pompage. La durée minimale de chaque essai est de 5 minutes. Dans tous les cas, la variation minimale de la hauteur d'eau entre le départ et l'arrêt de la pompe doit être de 150 mm.

10.5.4 Nombre d'essais

Un minimum de trois essais doivent être effectués dans un intervalle de temps le plus court possible. La totalité des essais doit être effectuée à l'intérieur d'une période de 48 heures consécutives. Lors d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit, l'écart maximal toléré par rapport aux valeurs *in situ* doit être respecté pour chacun des essais. Dans le cas contraire, un nouvel essai doit être effectué.

10.6 ÉVALUATION DU SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT *IN SITU*

Dans le cas d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit *in situ*, les variables suivantes sont requises :

- Volume d'eau totalisé pendant la période de l'essai par le système *in situ*;
- Volume d'eau totalisé pendant la période de l'essai par la méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage.

Le Tableau 54 présente un exemple de données brutes issues d'une vérification de l'exactitude impliquant un poste isolé constitué d'une seule pompe avec la méthode utilisant la capacité d'une pompe d'un poste de pompage.

Tableau 54 : Vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit *in situ*

Essai	Capacité de la pompe (m^3/s)	Durée essai (secondes)	Volume essai (m^3)	Volume <i>in situ</i> (m^3)	Écart (%)
1	0,35	540	189,0	192,3	1,74
2		530	185,5	190,7	2,80
3		560	196,0	199,2	1,63

Si l'écart obtenu pour chaque essai est inférieur à l'écart maximal toléré, l'exactitude du système de mesure *in situ* est donc conforme.

10.7 CAUSES D'ERREUR DE LA MÉTHODE UTILISANT LA CAPACITÉ D'UNE POMPE D'UN POSTE DE POMPAGE

Les sources d'erreur sont principalement reliées aux éléments suivants :

- Erreurs dues à la détermination de la capacité de la pompe;
- Erreurs dues au calcul du temps de la vidange :
 - Résolution inadéquate du chronomètre;
 - Décalage entre le démarrage/arrêt du chronomètre lors de la vidange;
 - Décalage entre l'horodatage et les mesures de la hauteur d'eau;
- Erreurs dues à la méthode :
 - Durée ou nombre d'essais inadéquat;
 - Vitesse de la pompe non constante au cours de l'essai;
 - Pompe qui ne fonctionne pas au maximum de sa capacité;
 - Caractéristiques du poste de pompage qui ne sont pas prises en considération (ex. : nombre de pompes, mode de fonctionnement des pompes).

10.8 UTILISATION DE LA MÉTHODE BASÉE SUR LA CAPACITÉ D'UNE POMPE D'UN POSTE DE POMPAGE EN TANT QUE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit *in situ*, la méthode basée sur la capacité d'une pompe d'un poste de pompage est utilisée en tant que méthode de référence. La valeur de débit ainsi mesurée sera comparée avec la mesure simultanée du débit *in situ* (par le système de mesure en vérification) pour le calcul de l'écart entre ces deux valeurs de débit. On pourra ainsi valider que l'écart maximal toléré (ex. : par un règlement) est bien respecté.

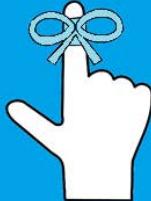
Trois essais sont requis et l'écart maximal toléré doit être respecté pour chaque essai et non pour la moyenne des essais. S'il est possible de procéder à des essais à trois niveaux de débit (min – moy – max de l'intervalle de mesure du système de mesure de débit *in situ*), un seul essai peut-être réalisé par niveau de débit si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, il peut être requis de procéder à trois essais pour un des niveaux de débit afin de valider le résultat obtenu.

Pour procéder adéquatement à la vérification de l'exactitude, il est requis d'appliquer les éléments décrits à la section 6 du présent document. De plus, la section 12 décrit les précisions relatives au rapport à produire afin qu'il soit complet.

Capacité d'une pompe d'un poste de pompage...

Peut être utilisée en tant que méthode de référence si :

- La capacité de la pompe est connue (voir section 5);
- La pompe fonctionne à vitesse constante.



Un poste de pompage se définit par :

- son type : isolé/non isolé;
- le nombre de pompes : 1 pompe/plus d'une pompe;
- le mode de fonctionnement des pompes : en alternance, simultané ou séquentiel.

Méthode applicable dans le cas de la mesure du débit sortant du poste de pompage.

Les 3 essais doivent être les plus longs possible (> 5 minutes et Δ minimale de hauteur d'eau de 150 mm) et être effectués à l'intérieur d'une période de 48 heures consécutives.

L'annexe 5 présente un exemple de grille terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit à l'aide de cette méthode.

11 MÉTHODE UTILISANT UN APPAREIL DE RÉFÉRENCE

La présente méthode permet d'obtenir une mesure de débit ponctuelle ou de volume d'eau à l'aide d'un appareil de référence, c'est-à-dire un dispositif de mesure de la vitesse, de la pression, de l'intensité d'un courant électrique ou de tout autre paramètre dont la variation peut être directement mise en corrélation avec le débit d'écoulement.

Cette méthode peut donc permettre d'établir une mesure de débit indépendante qui sera utilisée en tant que méthode de référence dans le cadre d'une vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit.

Cette méthode s'applique aux écoulements en conduites fermées.

11.1 TYPES D'APPAREILS DE RÉFÉRENCE

Un appareil de référence est un instrument de mesure qui permet d'obtenir des valeurs de débit les plus près possible de la valeur vraie.

Les types d'appareils de référence utilisés peuvent par exemple être des débitmètres à ultrasons dont l'installation se fait à l'extérieur de la conduite, comme c'est le cas pour les débitmètres à temps de parcours (*clamp-on*) ou les Doppler externes. La description et les conditions d'utilisation de ces équipements sont présentées à la section 4.4.3.

11.2 CONDITIONS D'UTILISATION DE L'APPAREIL DE RÉFÉRENCE

L'utilisation d'un appareil de référence implique le respect des conditions suivantes :

- L'erreur de mesure de l'appareil de référence doit être égale ou inférieure à 2,5 % (il s'agit de l'erreur qui fait généralement référence à la notion de « précision » décrite par le fabricant);
- L'appareil de référence doit être utilisé dans les conditions d'utilisation prescrites par le fabricant. Les paramètres à considérer diffèrent selon le type d'appareil de mesure utilisé et portent généralement sur :
 - Le diamètre intérieur de la conduite;
 - L'intervalle de mesure des vitesses;
 - La pression;
 - Les longueurs amont et aval sans perturbation (coude, valve, etc.);
 - Les propriétés de l'eau (turbidité, conductivité, température, etc.);
 - Les conditions d'écoulement;
 - Le matériau, l'état et l'épaisseur de la conduite.

Les paramètres applicables doivent être vérifiés au moment de l'essai pour être comparés aux conditions d'utilisation prescrites par le fabricant.

Le choix de l'appareil de référence doit toujours se porter sur celui dont les mesures sont affectées par le moins de paramètres possible ou par les effets les plus négligeables de ces paramètres;

- L'appareil de référence doit être étalonné annuellement ou à un intervalle de temps plus court lorsqu'un dérèglement de l'appareil est soupçonné. L'étalonnage doit s'effectuer en différents points sur sa plage de vitesses;

L'étalonnage de l'appareil de référence doit se faire selon des procédures reconnues telles que les normes ISO 4185 (méthode par pesée) et ISO 8316 (méthode par jaugeage d'un réservoir volumétrique) ou encore sur banc d'étalonnage comportant un étalon retracable pour lequel un certificat d'étalonnage est délivré;

Les spécifications techniques ainsi que l'erreur de mesure de l'appareil de référence doivent apparaître dans son certificat d'étalonnage.

- L'organisme procédant à l'étalonnage de l'appareil de référence doit être certifié, c'est-à-dire lié à une référence nationale ou internationale (ISO 17025, BNQ, etc.).
- L'appareil de référence doit idéalement être installé sur la même conduite que celle où se trouve l'équipement à vérifier ou sur une conduite de contournement, selon les prescriptions du fabricant.

Le non-respect des conditions d'utilisation de l'appareil de référence (ex. : non-respect des longueurs amont et aval sans perturbation) peut occasionner des erreurs dans les mesures effectuées. Ces erreurs et les justifications nécessaires doivent être présentées dans le rapport (ex. : facteur de correction).

11.3 CONDITIONS *IN SITU* À RESPECTER PRÉALABLEMENT AUX ESSAIS

Chaque essai doit se dérouler sur un écoulement stable ou en régime permanent. La conduite doit toujours être pleine et sans bulles d'air ou de gaz. L'écoulement ne doit subir aucune fluctuation de pression ni aucune pulsation qui pourrait affecter le mesurage. Avant de commencer un essai, il est d'ailleurs recommandé d'attendre que l'appareil de mesure se stabilise (ex. : 15 minutes dans des conditions environnantes stables).

Idéalement, la validation du « zéro » de l'appareil doit être réalisée. Pour ce faire, l'écoulement doit être arrêté et la conduite laissée pleine d'eau.

11.4 DÉTERMINATION DU VOLUME D'EAU ET DU DÉBIT

Les débits instantanés (minimamente une donnée par minute) et le volume doivent être consignés pendant la période de l'essai pour que les données obtenues soient représentatives des conditions d'écoulement qui prévalaient. Si l'appareil n'est muni que d'un totalisateur de volumes, les volumes affichés doivent être notés au moins toutes les minutes afin qu'on puisse connaître la variabilité de l'écoulement.

11.5 DURÉE ET NOMBRE D'ESSAIS

Idéalement, en présence d'un débit variable (ex. : débit jour/nuit d'une station municipale, mesure du débit des eaux de ruissellement, etc.), un essai de 30 minutes devrait être fait sur

trois niveaux de débit (donc 30 minutes par niveau) qui correspondent à la plage habituelle d'écoulement *in situ*. Ces trois niveaux permettent donc de déterminer une mesure ponctuelle aux débits minimal (pas moins de 10 % du débit maximal), moyen et maximal.

Pour mesurer le débit d'un écoulement régulier (ex. : sortie d'un bassin de rétention), on doit effectuer trois essais à écoulement continu d'une durée d'au moins 30 minutes chacun. Ces trois essais permettent d'établir le débit ponctuel uniquement pour l'intervalle de débit qui existait au cours des essais.

11.6 CAUSES D'ERREUR DE LA MÉTHODE UTILISANT UN APPAREIL DE RÉFÉRENCE

Les causes d'erreur sont principalement reliées aux éléments suivants :

- Erreurs dues à l'appareil de référence :
 - Erreur de mesure > 2,5 %;
 - Dérivation de la mesure de l'appareil de référence;
- Erreurs dues aux conditions *in situ* :
 - Non-respect des conditions décrites par le fabricant;
 - Conditions d'écoulement inappropriées (ex. : présence de bulles d'air, fluctuation de pression, etc.);
- Erreurs dues à la méthode :
 - Délai trop court pour permettre la stabilisation de l'appareil;
 - Fréquence insuffisante des mesures;
 - Durée ou nombre d'essais inadéquat.

11.7 UTILISATION DE LA MÉTHODE IMPLIQUANT UN APPAREIL DE RÉFÉRENCE EN TANT QUE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre de la vérification de l'exactitude d'un système de mesure de débit *in situ*, la méthode utilisant un appareil de référence est employée en tant que méthode de référence. La valeur de débit ainsi mesurée sera comparée avec la mesure simultanée du débit *in situ* (par le système de mesure en vérification) pour le calcul de l'écart entre ces deux valeurs de débit. On sera ainsi en mesure de valider que l'écart maximal toléré (ex. : par un règlement) est bien respecté.

Trois essais sont requis et l'écart maximal toléré doit être respecté pour chaque essai et non pour la moyenne des essais. S'il est possible de procéder à des essais à trois niveaux de débit (min – moy – max de l'intervalle de mesure du système de mesure de débit *in situ*), un seul essai peut-être réalisé par niveau de débit si toutes les conditions d'application de la méthode sont respectées. Dans le cas contraire, il peut être requis de procéder à trois essais pour un des niveaux de débit afin de valider le résultat obtenu.

Afin de procéder adéquatement à la vérification de l'exactitude, il est requis d'appliquer les éléments décrits à la section 6 du présent document. De plus, la section 12 décrit les précisions relatives au rapport à produire afin qu'il soit complet.

Appareil de référence...

Dispositif de mesure (vitesse / pression / intensité d'un courant électrique / etc.) dont la variation peut être directement mise en corrélation avec le débit d'écoulement de l'eau.



Méthode de référence applicable en conduite fermée dont l'utilisation implique les conditions suivantes :

- sur conduite pleine, écoulement stable ou régime permanent;
- erreur de mesure $\leq 2,5\%$;
- utilisation dans les conditions prescrites par le fabricant;
- étalonné annuellement par un organisme lié à une référence nationale ou internationale;
- installé idéalement sur la même conduite que celle de l'équipement en vérification;
- 3 essais d'une durée minimale de 30 minutes chacun.

L'annexe 5 présente un exemple de grille terrain pour la vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit à l'aide de cette méthode.

12 PRÉCISIONS RELATIVES AU RAPPORT À PRODUIRE

12.1 CONTENU DU RAPPORT DE VÉRIFICATION

Le rapport de vérification constitue la pièce justificative principale de la démarche de vérification de l'exactitude d'un système de mesure du débit ou du volume d'eau.

Les éléments d'information qu'il contient doivent permettre de confirmer la fiabilité des résultats obtenus lors de la vérification.

Le rapport doit comporter la date des essais, le nom, le titre et la signature de la personne qui a réalisé les travaux de même que ceux du spécialiste de la firme (ex. : hydrologue ou ingénieur en hydraulique) qui a validé les résultats de la vérification et approuvé les recommandations. Il doit être rédigé en français et toutes les données pertinentes du rapport ou des annexes, présentées selon le système métrique, doivent être accompagnées de leurs unités de mesure.

De plus, le rapport doit minimalement comporter les renseignements suivants, dans la mesure où ils s'appliquent à la méthode de vérification utilisée :

- 1- Sommaire (souhaitable)
- 2- Mise en contexte
 - a. Date de la vérification
 - b. Emplacement du site (ex. : nom de l'entreprise, de la municipalité)
 - c. Désignation de l'effluent (ex. : EFF-1 – Effluent final n°1)
 - d. Type d'effluent (ex. : eau potable, eaux usées municipales, eaux usées industrielles)
 - e. Référence des exigences (ex. : règlement, autorisation, directive)
 - f. Description des exigences de suivi du débit (ex. : mesure hebdomadaire, en continu)
 - g. Écart maximal toléré (ex. : 10 %)
- 3- Description de l'installation d'écoulement et du système de mesure *in situ* (éléments primaire et secondaire)
 - a. Photographies et schémas
 - b. Types, marques et modèles des équipements
 - c. Description des caractéristiques techniques de l'appareil (y compris les spécifications techniques du fabricant) (ex. : intervalle de mesure, unités, fréquence des mesures, erreur de mesure de l'appareil, méthode d'enregistrement)
 - d. Dimensions du canal ou de la conduite
 - e. État général (encrassement, déformations, fissures, etc.)
 - f. Conditions d'écoulement dans l'élément de mesure ainsi qu'en amont et en aval
 - g. Intervalles de mesure : minimal, maximal et moyen typiques quotidiens

- h. Description et conformité de l'installation par rapport aux recommandations du fabricant (ex. : matériau, sens de l'écoulement, éléments perturbateurs, longueurs amont et aval sans perturbation)
- 4- Description du système de transmission des données (systèmes de référence et *in situ*), le cas échéant
- 5- Description de la méthode de vérification du système de mesure *in situ*
- a. Détails de l'application de la méthode (schémas, photos, etc.)
 - a. Description des appareils utilisés pour la vérification : type d'appareil, marque, modèle, numéro de série, principe de fonctionnement, erreur de mesure, dimensions, intervalle de mesure et correspondance avec les conditions *in situ*, le cas échéant (ex. : appareil de référence)
 - b. Date d'étalonnage de l'appareil utilisé (si applicable), y compris le certificat d'étalonnage délivré par un organisme reconnu
 - c. Description des caractéristiques et de l'emplacement de la section de mesurage sélectionnée pour la vérification (ex. : distance par rapport au système de mesure *in situ*, installation sur une conduite de contournement)
- 6- Description de la méthode de vérification du système de transmission des données, le cas échéant
- 7- Présentation des résultats de vérification
- a. Présentation des données brutes et des calculs effectués
 - b. Valeurs (débit ou volume) obtenues par le système de mesure *in situ* et par la méthode de référence, ainsi que l'écart calculé pour chacun des essais selon la méthode de calcul décrite à la section 6
- 8- Interprétation des résultats
- 9- Conclusion quant à la conformité de l'installation et à sa capacité à produire des mesures fiables, et recommandations lorsque requis
- 10- Annexes
- a. Sommaire du dernier rapport de vérification de l'exactitude du système de mesure (conclusions, recommandations et correctifs apportés)
 - b. Copie du certificat d'étalonnage le plus récent de l'appareil utilisé pour la vérification, si applicable
 - c. Rapport détaillé des vérifications et des correctifs effectués sur l'installation d'écoulement, sur le système de mesure *in situ* et sur le système de transmission, le cas échéant
 - d. Données brutes des essais de vérification de l'exactitude (le cas échéant, fournir les données enregistrées sur papier graphique ou compilées à l'aide d'un logiciel) et des autres paramètres pertinents (température, pression, etc.) mesurés au cours des essais
 - e. Courbes et tables utilisées pour la détermination des débits

f. Certificats d'analyse (méthode de dilution avec traceur)

12.2 CONSERVATION DU RAPPORT

Le rapport doit être conservé sur place pendant la période minimale indiquée dans le règlement applicable ou dans un autre texte ou document légal, à partir de la date de sa production, et demeurer en tout temps disponible pour consultation par un représentant du Ministère.

Rapport de vérification...



Pièce justificative de la démarche de vérification de l'exactitude des systèmes de mesure du débit ou du volume d'eau.

Afin d'être acceptable, il doit inclure tous les éléments requis, dont les données brutes, les calculs, l'interprétation des résultats, la conclusion ainsi que les recommandations lorsque requis.

13 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES³²

Livres et articles

- AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE. *L'autosurveillance des agglomérations d'assainissement – Fiches thématiques*, Version 1, Nanterre, 2012, 22 p.
- AIBE, V. A. et autres. « Flow meter calibration by volumetric method and by weighing method using an innovative system », *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 648, Conference 1, 2015, 5 p.
- ANCEY, Christophe. *Mécanique des fluides – Une introduction à l'hydraulique pour les ingénieurs civils*, [Fichier PDF], Laboratoire Hydraulique Environnementale, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2017, 94 p. [<http://lhe.epfl.ch/cours/cours-meca.pdf>].
- ARFIB, Bruno. *Jaugeage d'un cours d'eau par la méthode de la dilution d'un traceur fluorescent : Méthodologie pour la mise en œuvre des mesures (au laboratoire et sur le terrain)*, [Fichier PDF en ligne], Note technique, Université Aix-Marseille, 2013, 8 p. [http://www.karsteau.fr/cours/JaugeageFluorimetreMethode_Arfib180913.pdf].
- AUBERT, Pierre. « Mesurage statique du volume des liquides », *Techniques de l'ingénieur*, 1996, R1440V1, 46 p. [www.techniques-ingenieur.fr].
- AXELSSON, Gudni, Grímur BJÖRNSSON et Francisco MONTALVO. *Quantitative Interpretation of Tracer Test Data*, [Fichier PDF en ligne], Proceedings World Geothermal Congress, 2005, Turquie, 12 p. [<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/1211.pdf>]
- BARBE, A. et autres. « Loi hauteur – débit d'un déversoir en mince paroi fonction de la charge totale et valable dans une large plage d'utilisation », *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, n° 3, 1967, p. 249-256.
- BARBIER, C. et autres. « Confirmation métrologique d'instruments volumétriques », [Fichier PDF en ligne], *La Revue STP Pharma Pratiques*, Hors-série, Société Française des Sciences et Techniques Pharmaceutiques (SFSTP), Paris, 23 p. [<https://docplayer.fr/44444866-Confirmation-metrologique-d-instruments-volumetriques.html>]
- BAKER C. R. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*, 2^e édition, 2016, 745 p.
- BARIL, Dominique, Dominique COURRET et Benjamin FAURE. *Note technique sur la conception des dispositifs de restitution du débit minimal*, [Fichier PDF en ligne], Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 2014, 24 p.

³² La dernière version publiée des méthodes doit être utilisée.

[www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/note-technique-dispositifs-restitution-debit-minimal-2014-01-20-f_cle21e2b7.pdf].

BENOIST, J. C., et F. BIRGAND. « Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles », *Ingénieries – E A T, IRSTEA*, 2002, hal-00465503, p. 51-63.

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. et autres. *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Édition TEC & DOC, 2000, 793 p.

BIGOT, Pascal. *La mesure du débit*, [Fichier PDF en ligne], CIRA-1 Les débits, 20 p. [<http://cira-couffignal.fr/archives/archives2013-2014/documents-coursTS1/mesure-debit.pdf>]. (Consulté le 19 février 2018).

BOS, M. G. *Discharge Measurement Structures*, 3^e édition, Wageningen (Pays-Bas), International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), 1989, 401 p.

BIRGAND, François et autres. « Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler – Cas des petits cours d'eau ruraux », *Ingénieries – E A T, IRSTEA*, 2005, hal-00476108, p. 23-39.

BROWN, Lance. *Measuring Water Flow – Water Supply Factsheet*, [Fichier PDF en ligne], Ministry of Agriculture and Lands – Resource Management Branch – British Columbia, n° 501.400-1, 2006, 9 p. [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/water/livestock-watering/501400-1_measuring_water_flow.pdf].

BUREAU OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER MANAGEMENT. *Wastewater Treatment Plant Operator Training, Module 25: Introduction to Flowmeters*, [Fichier PDF en ligne], Department of Environmental Protection, 2012, 102 p. [http://files.dep.state.pa.us/Water/BSDW/OperatorCertification/TrainingModules/ww25_intro_to_flowmeters_wb.pdf].

CETMEF – CENTRE D’ÉTUDES TECHNIQUES MARITIMES ET FLUVIALES. *Notice sur les déversoirs – Synthèse des lois d’écoulement au droit des seuils et déversoirs*, ministère des Transports, de l’Équipement, du Tourisme et de la Mer, Département Environnement Littoral et Cours d’Eau, Division Hydraulique et Sédimentologie Fluviales, 2005, 87 p.

CLEMMENS, A. J. et autres. *Water Measurement with Flumes and Weirs*, 3^e édition, Les Pays-Bas, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2001, 382 p.

COURIVAUD, Jean-Robert. « Mesures in situ en hydraulique à surface libre », *Techniques de l’ingénieur*, 2002, R2330V2, 46 p. [www.techniques-ingenieur.fr].

CRABTREE’S, Mike, *Flow Handbook*, [Fichier PDF], 2^e édition, 2000, 69 p. [<https://fr.scribd.com/doc/289414675/Flow-Hanbook>].

DASSIBAT, C., et P. PASCAUD. *Jaugeage de sources dans la région de Dives, Cabourg, Houlgate (Calvados)*, [Fichier PDF en ligne], Bureau de recherches géologiques et minières – Service Géologique National – Agence financière de Bassin Seine Normandie, Orléans, 1977, 27 p. [<http://infoterre.brgm.fr/rapports/77-SGN-285-PNO.pdf>].

DAUM, J.R. *Méthodologie du jaugeage des sources*, [Fichier PDF en ligne], ministère de l’Industrie, des Postes et Télécommunications et du Commerce extérieur, BRGM – Centre Thématique EAU, Montpellier, n° R 38193, 1994, 71 p. [http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/I_IFD_REFDOC_0047223/METHODOLOGIE-DU-JAUGEAGE-DES-SOURCES-n%C2%B0-38193].

DAUNIZEAU, Alain. « Recommandations sur la métrologie et la maîtrise de la qualité des équipements critiques », *Annales de Biologie Clinique*, 2013, volume 71, hors-série n° 1, p. 235-256.

DEMAGNY, J. Ch. « Mesures de vitesses et de débits par la méthode électromagnétique. Choix des matériels industriels », *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, n° 5, 1976, p. 361-367.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING. *Module 2 – Measurement Systems*, [Fichier PDF en ligne], Version 2, Indian Institute of Technology Kharagpur, 15 p. [http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Errors_and_Calibration.pdf] (Consulté le 14 février 2018).

DESPAX, Aurélien. *Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires*, 2016, Université Grenoble Alpes, 296 p.

DOBRIYAL, Pariva et autres. « A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management », *Applied Water Science*, 2017, Volume 7, n° 6, p. 2617-2628.

ENVIRONMENT AGENCY. *Minimum Requirements for the Self-Monitoring of Effluent Flow* [Fichier PDF en ligne], Version 4, MCERTS – Environment Agency’s Monitoring Certification Scheme, 2014, 37 p. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/373090/LIT_6695.pdf].

ENVIRONNEMENT CANADA. *Document d'orientation pour les mesures de débit des effluents de mines de métaux*, [Fichier PDF en ligne], Division des minéraux et des métaux – Service de la protection de l'environnement, 2001, 39 p. [<http://publications.gc.ca/site/fra/425306/publication.html>].

FATHOM SCIENTIFIC LTD. *Derivation, Uncertainty, and Variance of the Calibration Factor used in Salt Dilution Flow Measurements*, [Fichier PDF en ligne], 2015, 16 p.

[<http://www.fathomscientific.com/derivation-uncertainty-and-variance-of-the-calibration-factor-used-in-salt-dilution-flow-measurements/>].

FATHOM SCIENTIFIC LTD. *Quantifying and Controlling Error in Salt-Dilution Measurements*, [Fichier PDF en ligne], 2015, 11 p. [<http://www.fathomscientific.com/sderror/>].

FATHOM SCIENTIFIC LTD. *Quantifying and Controlling Error in Salt-Dilution Measurements: Sources of Uncertainty*, [Fichier PDF en ligne], 2015, 9 p. [<http://www.fathomscientific.com/quantifying-and-controlling-error-in-salt-dilution-measurements-part-2/>].

GARCÍA PARRA, Brian et autres. « Uncertainty of discharge estimation in high-grade Andean streams », *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, Volume 48, p. 42-50. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598616300127>].

GRAIE. *Fiche n°8 : Mesurage du débit transité ou déversé sur les postes de relèvement/refoulement*, [Fichier PDF en ligne], [http://www.graie.org/graiedoc/reseaux/autosurv/F8_debitposterelev.pdf] (Consulté le 1^{er} février 2018).

HAUER, F. Richard, et Gary A. LAMBERTI. *Methods in Stream Ecology*, 2^e édition, Amsterdam, Elsevier inc., 2007, 895 p.

HERSCHY, Reginald W. *Streamflow Measurement Structures*, 3^e édition, Oxon (Oxfordshire), Taylor & Francis, 2009, 510 p.

HOUSER, John F. *Procedures for the Calibration of Volumetric Test Measures*, [Fichier PDF en ligne], National Institute of Standards and Technology (NIST) – Institute for Basic Standards – National Bureau of Standards, Washington, 1973, 23 p. [<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/73-287.pdf>].

HYDROMATCH. *Flow Estimation for Streams and Small Rivers*, [Fichier PDF en ligne], [<https://www.hydromatch.com/sites/default/files/downloads/DIY-flow-measurement-guide.pdf>] (Consulté le 31 janvier 2018).

JEZEQUEL, Ludovic. *Débitmètre à organe déprimogène*, [Fichier PDF en ligne], Éduscol, ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, République française, 6 p. [http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/jezequel/1-organes%20deprimogenes.pdf] (Consulté le 15 février 2018).

JOBSON, Harvey E. *Prediction of Traveltime and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams*, [Fichier PDF en ligne], U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4013, 38 p. [<https://pubs.usgs.gov/wri/1996/4013/documents/dispersion.pdf>] (Consulté le 15 septembre 2016).

KADIR, Boris. « Mesures du débit par ultrasons – Mesure en écoulement à surface libre », *Techniques de l'ingénieur*, 2004, R2266V1, 20 p. [www.techniques-ingenieur.fr].

KILPATRICK, Frederik A., et Ernest D. COBB. *Measurement of Discharge Using Tracers*, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, United States Government printing Office, Washington, 1985, Book 3, Chap. A16, 52 p.

KULIN, Gershon, et Philip R. COMPTON. *A Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow*, [Livre numérique], Washington, U.S. Departement of Commerce, National Bureau of Standards, 1975, 97 p.

LE COZ, Jérôme et autres. *Contrôle des débits réglementaires – Application de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement – Guide technique Police de l'eau*, [Fichier PDF en ligne], Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 2011, 132 p. [www.fomodo.fr/files/ONEMA_controle-debits-reglementaires_11-2011.153.pdf].

LE COZ, Jérôme et autres. *Mesures hydrologiques par profileur Doppler*, [Livre numérique], France, Éditions Quae, 2008, 154 p.

LE COZ, Jérôme et autres. « Mesures hydrologiques par profileur Doppler (aDcp) en France : application aux cours d'eau et aux réseaux urbains », *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 2009, p. 115-122.

LEVESQUE, Victor A., et Kevin A OBERG. *Computing Discharge Using the Index Velocity Method: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3-A23*, [Fichier PDF en ligne], 2012, 148 p. [<http://pubs.usgs.gov/tm/3a23/>].

LITTLE, Derek, *Hydrological Studies*, [Fichier PDF en ligne], U.S. Environmental Protection Agency, Science and Ecosystem Support Division, 2016, 23 p. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/hydrologic_studies501_af.r4.pdf]

MICHAUD, Joy. P., et Marlies WIERENGA. *Estimating Discharge and Stream Flows – A Guide for Sand and Gravel Operators*. EnviroVision, Washington State Department of Ecology, 2005, 37 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, *Charte qualité de l'hydrométrie – Guide de bonnes pratiques*, [Fichier PDF], Toulouse, 2^e édition, 2017, 84 p. [https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/pdf/Schapi_Charte_hydro_P01-84_BasseDefinition_5Mo_.pdf]

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, *Guide pratique – Intercomparaisons de mesures de débit en rivière*, [Fichier PDF en ligne], Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) France, 2016, 52 p. [http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0537086/guide-pratique-intercomparaisons-de-mesures-de-debit-en-riviere]

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE – UNIVERSITÉ VIRTUELLE DE TUNIS. *Mesures et instrumentations – Mesure de débit*, [Fichier PDF en ligne], 2015. [<http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre4/pdf/chapitre4.pdf>]

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE EXTÉRIEUR. *Circulaire n° 93.00.110.001.1 du 18 mars 1993 relative à l'utilisation de moyens d'étalonnage dans le domaine du mesurage statique ou dynamique de liquides*, Paris, Direction de l'Action Régionale et de la Petite et Moyenne Industrie – Sous-direction de la métrologie, 1993, 25 p.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. *Guide de soutien technique pour la clientèle – Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau*, [Fichier PDF en ligne], Gouvernement du Québec, 2011, 88 p. [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/Guide-soutien-clientele.pdf>]

MINISTRY OF ENVIRONMENT. *Manual of British Columbia Hydrometric Standards*, [Fichier PDF], Colombie-Britannique, Resources Information Standards Committee, 2009, 204 p. [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/science-data/man_bc_hydrometric_stand_v10.pdf].

MOORE, Dan. « Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement: Part 1 », *Streamline: Watershed Management Bulletin*, 2004, Volume 7, n°4, p. 20-23. [https://www.researchgate.net/publication/228822476_Introduction_to_salt_dilution_gauging_for_streamflow_measurement_Part_1].

MOORE, Dan. « Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement, Part 2: Constant-rate Injection », *Streamline: Watershed Management Bulletin*, 2004, Volume 8, n°1, p. 11-15. [https://www.researchgate.net/publication/228822476_Introduction_to_salt_dilution_gauging_for_streamflow_measurement_Part_2].

MOORE, Dan. « Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement, Part 3: Slug Injection Using Salt in Solution », *Streamline: Watershed Management Bulletin*, 2005, Volume 8, n°2, p. 1-6. [https://www.researchgate.net/publication/228822476_Introduction_to_salt_dilution_gauging_for_streamflow_measurement_Part_3].

HUDSON, Rob, et John FRASER. « Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement, Part IV: The Mass Balance (or Dry Injection) Method », *Streamline: Watershed Management Bulletin*, 2005, Volume 9, n°1, p. 6-12. [https://www.uvm.edu/bwrl/lab_docs/protocols/2005_Hudson_and_Fraser_Simple_slug_salt_dilution_gauging_method_Streamline.pdf].

NATIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING STANDARDS (NEMS). *Open Channel Flow Measurement – Measurement, Processing and Archiving of Open Channel Flow Data*, [Fichier PDF en ligne], 2013, Version 1.1, 77 p.

[<https://www.lawa.org.nz/media/16578/nems-open-channel-flow-measurement-2013-06.pdf>].

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, *Standard Operating Procedure for Gravimetric Calibration of Dynamic Volumetric Systems Used as Standards*, [Fichier PDF en ligne], SOP 26, 2016, 16 p. [https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/wmd/labmetrology/SOP_26_2016_0121.pdf].

NATIONAL MEASUREMENT SYSTEM. *Good Practice Guide – An Introduction to Data Analysis in Flow Measurement*, [Fichier PDF en ligne], Écosse, TUV SUD NEL, 28 p. [<https://www.tuv-sud.co.uk/uploads/images/1523377544519722640016/an-introduction-to-wet-gas-flow-metering.pdf>].

NATIONAL MEASUREMENT SYSTEM. *Good Practice Guide – The Calibration of Flow Meters*, [Fichier PDF en ligne], Écosse, TUV SUD NEL, 35 p. [<https://www.tuv-sud.co.uk/uploads/images/1523011053028922650326/calibration-of-flow-meters.pdf>].

OKUNISHI, Kazuo, Takashi SAITO et Toshio YOSHIDA. « Accuracy of stream gauging by dilution methods », *Journal of hydrology*, 1992, Volume 137, n° 1-4, p. 231-243. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169492900584>].

OPEN CHANNEL FLOW. *HS/H/HL Flume – User's Manual*, [Fichier PDF en ligne], 17 p. [www.openchannelflow.com].

PATON, Richard. *Calibration and Standards in Flow Measurement*, [Fichier PDF en ligne], National Engineering Laboratory, Scotland, UK, 2005, 5 p. [<https://www.wiley.com/legacy/wileychi/hbmsd/pdfs/mm269.pdf>].

PELLETIER, Patrice M. « Uncertainties in the single determination of river discharge: a literature review », *Revue canadienne de génie civil*, 1988, Volume 15, n° 5, p. 834-850. [<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/l88-109#.XEIwd2NCdpg>].

PLASTI-FAB. *Palmer-Bowlus Flumes*, [En ligne], 17 p. [<https://www.plasti-fab.com/products/palmer-bowlus-flumes>].

RANTZ, S. E. et autres. *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*, [Fichier PDF en ligne], U.S. Geological Survey, United States Government Printing Office, Washington, 1982, 313 p. [https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/pdf/WSP2175_vol1a.pdf].

RÉSEAU ENVIRONNEMENT. *Stratégie d'économie d'eau potable – L'économie d'eau potable et les municipalités*, Gouvernement du Québec, 2016, 160 p.

REVITT, D. Michael, J. Bryan ELLIS et Nikaloas PATERAKIS. *A Comparaison of Pulse Dosing and Continuous Tracer Dosing for the Determination of Sewer Exfiltration*, [Fichier PDF en ligne], Urban Pollution Research Centre, School of Health and Social Sciences,

Middlesex University, 9 p. [https://www.researchgate.net/publication/228500710_A_COMPARISON_OF_PULSE_TRACER_DOSING_AND_CONTINUOUS_TRACER_DOSING_FOR_THE_DETERMINATION_OF_SEWER_EXFILTRATION].

RICHARDSON, Mark E. *Refinement of Tracer Dilution Methods for Discharge Measurements in Steep Mountain Streams*, Thèse, The University of British Columbia, 2015, 71 p. [En ligne]. [<https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0166725>].

ROYET P., *La surveillance et l'entretien des petits barrages*, Guide pratique, Cemagref, 2^e édition, 2006, 86 p.

SANITATION DISTRICTS OF LOS ANGELES COUNTY. *Industrial Wastewater Flow Measurement Requirements*, [En ligne], Docs: 579606, 2012, 7 p. [<https://www.lacsd.org/civicax/filebank/blobdload.aspx?blobid=2108>].

SCHMADEL, N. M. et autres. « Stream solute tracer timescales changing with discharge and reach length confound process interpretation », *Water Resources Research*, American Geophysical Union, 2016, Volume 52, n° 4, hal-01585143, p. 3227-3245

SKOGERBOE, G. V. et autres. *Desing and Calibration of Submerged Open Channel Flow Measurement Structures: Part 2, Parshall Flumes*, PRWG31-3, Logan, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, 1967.

SOUTH FLORIDA WATER MANAGEMENT DISTRICT. *Applicant's Handbook for Water Use Permit Applications*, [Fichier PDF en ligne], Floride, 2015, 115 p. [https://www.sfwmd.gov/sites/default/files/documents/wu_applicants_handbook.pdf].

SOUTH FLORIDA WATER MANAGEMENT DISTRICT. *Permit Compliance Handbook for Water Use Monitoring and Reporting Flow*, [Fichier PDF], Floride, 2006, 351 p.

SUEZ, LE MEMENTO DEGREMONT®. *Déversoirs*, [En ligne], [<https://www.suezwaterhandbook.fr/formules-et-outils/formulaire/hydraulique/deversoirs>] (Consulté le 6 février 2018).

TELEDYNE ISCO. *Teledyne ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*, 8^e édition, 536 p.

THORSEN, T., et R. ODEN. « How to Measure Industrial Wastewater Flow », *Chemical Engineering*, Volume 82, n° 4, 1975, p. 95-100.

TURNER DESIGNS. *10-AU Field Fluorometer, Technical Note: A Practical Guide to Flow Measurement*, 2001, 29 p. [<http://docs.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998-5000.pdf>].

TURNER DESIGNS. *Preparation of Standards for Dye Studies Using Rhodamine WT (Fluorometric Facts)*, 1995, 6 p. [https://www.fondriest.com/pdf/turner_rhodamine_dye.pdf].

TURNIPSEED, D. Phil, et Vernon B. SAUER. *Discharge Measurements at Gaging Stations, Chapter 8 of Book 3, Section A*, [Fichier PDF en ligne], U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2010, 106 p. [<https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/pdf/tm3-a8.pdf>].

TRIGASFI – FLOW MEASUREMENT AND CALIBRATION, *Débitmètres : Pratiques recommandées et étalonnage*, [En ligne], 2008, [<http://www.trigasfi.com>].

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR – BUREAU OF RECLAMATION. *Water Measurement Manual*, [Fichier PDF en ligne], 3^e édition, Government Printing Office, Washington, 2001, 327 p. [www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/WMM_3rd_2001].

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. *National Engineering Handbook, Part 650 – Engineering Field Handbook, Chapter 3 – Hydraulics*, [Fichier PDF en ligne], 125 p. (Consulté le 12 juillet 2018). [<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17542.wba>]

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *NPDES Compliance Inspection Manual*, [Fichier PDF en ligne], New York, 2004, 802 p. [<https://www.epa.gov>].

VAZQUEZ, José. *Hydraulique à surface libre*, [Fichier PDF en ligne], École Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, 104 p. [http://engees.unistra.fr/fileadmin/user_upload/pdf/shu/cours_HSL_FI_2006.pdf].

WOLKERSDORFER, C. *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*. Springer, 2008, 465 p.

Zellweger, G.W. « Testing and comparison of four ionic tracers to measure stream flow loss by multiple tracer injection », *Hydrological Process*, Volume 8, 1994, p. 155-165. [<https://pubs.er.usgs.gov/publication/70017448>].

Normes

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *Appareils de mesure électriques et électroniques – Expression des performances*, [3^e éd.], [Genève], 2001, 76 p. (CEI/IEC 60359 : 2001)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais* [2^e éd.], [Genève], ISO, 2005, 40 p. (ISO/IEC : 17025).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Flow measurement structures – Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes* [2^e éd.], [Genève], ISO, 2013, 84 p. (ISO : 4359).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometric determinations – Flow measurement in open channels using structures – Flat-V weirs*, [4^e éd.], [Genève], ISO, 2012, 66 p. (ISO : 4377).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrométrie – Appareils de mesure du niveau de l'eau*, [3^e éd.], [Genève], ISO, 2008, 26 p. (ISO : 4373).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrométrie – Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*, [4^e éd.], [Genève], ISO, 2007, 54 p. (ISO : 748F).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrométrie – Vocabulaires et symboles*, [5^e éd.], [Genève], ISO, 2011, 162 p. (ISO : 772).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Acoustic Doppler profiler – Method and application for measurement of flow in open channels*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 2012, 50 p. (ISO : 24578).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Calibration of current-meters in straight open tanks* [2^e éd.], [Genève], ISO, 2007, 20 p. (ISO : 3455).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods* [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 2010, 68 p. (ISO : 15769).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Open channel flow measurement using rectangular broad-crested weirs*, [3^e éd.], [Genève], ISO, 2008, 34 p. (ISO : 3846).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs*, [2^e éd.], [Genève], ISO, 2008, 66 p. (ISO : 1438).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Open channel flow measurement using triangular profile weirs*, [3^e éd.], [Genève], ISO, 2008, 34 p. (ISO : 4360).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Rotating-element current-meters*, [4^e éd.], [Genève], ISO, 2007, 18 p. (ISO : 2537).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Hydrometry – Velocity-area methods using current-meters – Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement*, [3^e éd.], [Genève], ISO, 2007, 56 p. (ISO : 1088).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method*, [3^e éd.], [Genève], ISO, 2004, 58 p. (ISO : 6416).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 5: Cone meter*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 2016, 22 p. (ISO : 5167-5).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles*, [2^e éd.], [Genève], ISO, 2008, 60 p. (ISO : 3966).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesurage du débit des liquides conducteurs dans les conduites fermées – Débitmètres électromagnétiques à brides – Longueur d'installation*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1998, 8 p. (ISO : 13359).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 1 : Principes généraux et exigences générales*, [2^e éd.], [Genève], ISO, 2003, 40 p. (ISO : 5167-1).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 2 : Diaphragmes*, [2^e éd.], [Genève], ISO, 2003, 58 p. (ISO : 5167-2).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 3 : Tuyères et Venturi-tuyères*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 2003, 38 p. (ISO : 5167-3).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 4 : Tubes de Venturi*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 2003, 32 p. (ISO : 5167-4).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées – Méthodes d'évaluation de la performance des débitmètres électromagnétiques utilisés pour les liquides*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1991, 18 p. (ISO : 9104).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées – Vocabulaires et symboles*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1977, 25 p. (ISO : 4006).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Canaux jaugeurs Parshall et SANIIRI*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 18 p. (ISO : 9826).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Mesurage de débit dans des conditions de glace*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 12 p. (ISO : 9196).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes d'exploration du champ des vitesses utilisant un nombre réduit de verticales*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1990, 10 p. (ISO : 9823).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs – Partie 1 : Généralités*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1994, 45 p. (ISO : 9555-1).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs – Partie 2 : Traceurs radioactifs*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 18 p. (ISO : 9555-2).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs – Partie 3 : Traceurs chimiques*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 13 p. (ISO : 9555-3).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs – Partie 4 : Traceurs fluorescents*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 16 p. (ISO : 9555-4).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par jaugeage d'un réservoir*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1987, 22 p. (ISO : 8316).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par pesée*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1980, 23 p. (ISO : 4185).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Mesure de débit d'un fluide conducteur dans les conduites fermées – Méthode par débitmètres électromagnétiques*, [1^{re} éd.], [Genève], ISO, 1992, 24 p. (ISO : 6817).

JCGM – JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, [3^e éd.], 2012, 108 p. (JCGM 200 :2012).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE. *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, [Paris], 2008 (F), 134 p. (OIML G 1-100).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE. *Exigences générales pour les instruments de mesure – Conditions environnementales*, [Paris], 2013 (F), 98 p. (OIML D 11).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE. *Principes du contrôle métrologique des équipements utilisés pour la vérification*, [Paris], 1993 (F), 18 p. (OIML D 23).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE. *Vérifications primitive et ultérieure des instruments et processus de mesure*, [Paris], 1988, 18 p. (OIML D 20).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE. *Vocabulaire international des termes de métrologie légale (VIML)*, [Paris], 2013 (E/F), 57 p. (OIML V 1).

Sites Internet

<https://2gmetrologie.com/>

<https://www.adcpro.fr/>

<http://www.avensyssolutions.com>

<https://www.badgermeter.de/fr/>

<https://www.bamofr>

<https://www.burkert.ca>

<http://www.cometec.fr/>

<http://www.ctplaton.com/>

<https://www.controles-essais-mesures.fr>

<https://de-de.wika.de>

<http://www.deltafluid.fr/>

<http://www.flowmeters.com>

<http://www.flow-tronic.com>

<https://www.fr.endress.com>

<https://www.gemu-group.com>

<http://www.geneq.com>

<http://www.globalw.com>

<https://greyline.com/>

<http://www.hellopro.fr>

<http://www.hoskin.qc.ca>

<https://hydreka.com/>

<https://www.ijinus.com/>

<http://www.intra-automation.com/>

<http://www.isco.com>

<https://www.kobold.com>

<https://krohne.com>

<https://www.mecon.de/en/>

<https://www.mmcontrol.com/>

<https://mccrometer.com>

https://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/consultatifs/etalonnage_index.html

<https://www.omega.ca>

<https://www.openchannelflow.com>

<https://www.ott.com/en-us/>

<http://www.plasti-fab.com>

<https://www.polycontrols.com/fr/>

<https://www.rosemount.com>

<http://www.rotameter-shop.fr>

<http://www.scadalliance.com/>

<https://sitelec.org/cours/dereumaux/mesurdebit.htm>

<https://www.sontek.com/>

<https://www.swagelok.com/en>

<http://www.tecfluid.fr/>

<http://www.teledyne.com/instrumentation>

<http://www.tempco.be>

https://www.vega.com/home_ca

<http://www.veoliawatertechnologies.ca>

<http://www.vpcfiberglass.com>

ANNEXE 1 : MÉTROLOGIE³³

En métrologie, un **mesurage** est le processus consistant à obtenir une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une **grandeur**.

Mesurage :

Action de mesurer. Ensemble des opérations qui permettent de déterminer la **mesure** d'une **grandeur**.

Mesurande :

Grandeur que l'on veut mesurer.

Mesure :

Résultat du mesurage.

Grandeur :

Propriété (caractéristique) d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence.

Ces caractéristiques peuvent être fondamentales (ex. : longueur, masse, temps, etc.) ou dérivées des grandeurs fondamentales (ex. : surface, vitesse, etc.).

Exemple : mesurer une grandeur physique (ex. : longueur) consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité (ex. : mètre).

Le **mesurage** s'effectue à l'aide d'un **appareil de mesure (instrument de mesure)** qui consiste en un dispositif utilisé seul ou associé à un ou à plusieurs dispositifs dans le but de constituer un **système de mesure**.

Les qualités métrologiques d'un **appareil de mesure** se basent sur : l'**étendue de mesure**, la **Résolution**, la **sensibilité**, l'**exactitude**, la **justesse** et la **fidélité**.

Étendue de mesure :

Fait référence à la valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes d'un intervalle nominal des indications.

Exemple : 20 V.

À ne pas confondre avec l'**intervalle de mesure** (ou **gamme de mesure**), qui consiste en l'ensemble des

³³ Définitions basées sur celles de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux en métrologie* (VIM).

valeurs de **grandeur**s d'une même nature qu'un **système de mesure** peut mesurer avec une **incertitude** instrumentale spécifiée, dans des conditions déterminées.

Exemple : -10 V à +10 V.

Résolution :

Indique la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible sur l'affichage de l'appareil.

Exemple : pour un appareil de mesure de niveau d'eau d'une résolution de 0,001 m, l'indication de la mesure variera dès qu'une variation de 1 mm du niveau d'eau sera perçue.

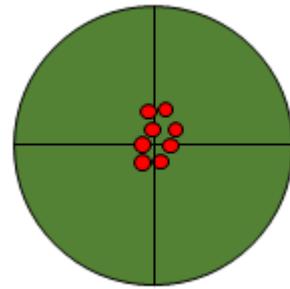
Sensibilité :

Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Exemple : le signal de sortie d'un appareil sensible sera en mesure de bien reproduire les fluctuations du signal d'entrée.

Exactitude :

Expression qualitative (non chiffrée) du degré de proximité entre une valeur mesurée et la **valeur vraie** (illustrée par le croisement des lignes au centre du cercle). Elle caractérise à la fois la différence par rapport à la moyenne (donc la **justesse**) et la dispersion (donc la **fidélité**) des mesurages.



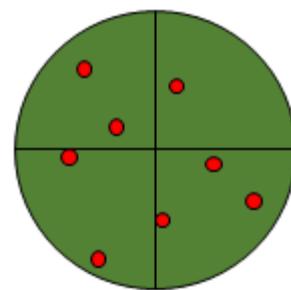
L'expression quantitative de l'exactitude correspond à l'**incertitude**.

Il ne faut pas confondre l'exactitude avec la **précision** qui, bien qu'étant synonyme dans le langage courant, n'existe pas en métrologie.

Justesse :

C'est l'aptitude à donner des indications égales à la **grandeur** mesurée.

Un capteur est juste si l'écart entre la moyenne des résultats et la **valeur vraie** (illustrée par le croisement des lignes au centre du cercle) est faible,



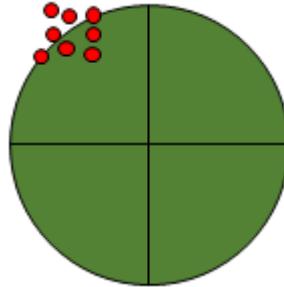
même si l'**écart type** est grand.

Fidélité :

L'**écart type** est défini comme étant une mesure de dispersion des données autour de la moyenne. Par exemple, plus l'écart type est grand, plus les données sont éloignées de chaque côté de la moyenne

Aptitude à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des indications voisines entre elles.

Elle définit donc la dispersion des résultats. Un appareil fidèle permet d'obtenir des mesures répétées centrées autour de leur moyenne, sans que la moyenne soit nécessairement proche de la **valeur vraie** (illustrée par le croisement des lignes au centre du cercle).



Un capteur est fidèle si l'**écart type** sur les réponses à une même valeur est faible.

Tout appareil ou procédure, et donc toute mesure, est entaché d'une **erreur (erreur de mesure)**.

Erreur :

Différence entre le résultat d'un **mesurage** et la **valeur vraie**. Elle s'exprime en unité de grandeur (erreur absolue, par exemple $20 \pm 0,5$ cm) ou en pourcentage (erreur relative qui est le rapport entre l'incertitude absolue et la mesure, par exemple 20 cm $\pm 2,5\%$).

Il y a deux types d'erreurs : **aléatoire** et **systématique**.

Exemple d'erreur aléatoire : une erreur due au temps de réaction variable d'un expérimentateur sur le démarrage et l'arrêt d'un chronomètre. Le temps peut être sur ou sous-évalué. La répétition des mesures pourra atténuer l'erreur aléatoire.

Exemple d'erreur systématique : c'est une erreur qui se reproduit à chaque mesure (biais); ce serait le cas si une règle dont il manque le premier centimètre était utilisée.

Valeur vraie :

C'est une valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait. Dans la pratique, la valeur vraie ne peut être mesurée, car le résultat d'une mesure est obligatoirement entaché d'erreur. Par contre, l'**incertitude de mesure** associée aux effets aléatoires et systématiques responsables de l'**erreur** peut être évaluée.

La question en métrologie n'est donc pas de savoir si une mesure est vraie ou fausse, mais plutôt d'estimer l'**incertitude** liée à la mesure effectuée.

L'**incertitude de mesure** correspond à l'expression du fait que pour un résultat de mesure donnée, il n'y a pas une seule valeur, mais un nombre infini de valeurs dispersées autour du résultat.

Incertainte = estimation de l'**erreur aléatoire** lors d'une **mesure**.

L'**incertitude** donne accès à un intervalle autour de la **valeur mesurée** dans lequel est censée appartenir la **valeur vraie**.

En d'autres mots, l'**incertitude** est la probabilité d'**erreur de mesure** et exprime « la quantité d'inexactitude ». Elle correspond à l'expression quantitative de l'**exactitude** et permet d'établir le seuil de confiance d'une mesure.

En fonction des exigences ou de la réglementation en vigueur, une **erreur maximale** peut être fixée pour un appareil ou un système de mesure.

L'**erreur maximale tolérée** (**limite d'erreur**, **erreur maximale acceptable**, **erreur maximale admissible**) correspond à la valeur extrême de l'**erreur de mesure**, par rapport à une **valeur de référence** connue, qui est tolérée par les exigences ou règlements pour un **mesurage**, un **instrument de mesure** ou un **système de mesure**.

Valeur de référence : Valeur d'une **grandeur** servant de base de comparaison pour les valeurs de grandeurs de même nature.

Pour valider que le **mesurage**, l'**instrument** ou le **système de mesure** respecte l'**erreur maximale tolérée**, une **vérification** est effectuée.

Vérification : Permet de fournir des preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées. À ne pas confondre avec l'**étalonnage**.

Exemple : la confirmation qu'un **système de mesure** de débit respecte l'**erreur maximale tolérée** par un règlement.

Dans le cadre d'une **vérification de l'exactitude**, le système de mesure de débit *in situ* est comparé avec une **méthode de référence** pour le calcul de l'**écart** entre les deux mesures de débit obtenues simultanément. Il est ainsi possible de valider que l'**écart maximal toléré** est bien respecté (ex. : 10 % d'écart par rapport à une autre méthode de mesure).

Pour les besoins d'une **vérification de l'exactitude**, la valeur obtenue par la méthode de référence est considérée comme la **valeur de référence**.

Écart :

Différence entre la valeur d'une **grandeur** et une **valeur de référence**. La valeur de référence peut être établie par une méthode ou par un **appareil de référence**.

Exemple : un écart de 5 % est calculé en comparant le débit mesuré par un **système de mesure** *in situ* avec le débit obtenu simultanément par une autre méthode de mesure de débit qui constitue la **valeur de référence** (ex. : volumétrique).

Écart maximal toléré :

Pour les besoins du présent document, il s'agit de la différence maximale acceptable entre la valeur obtenue par l'**instrument de mesure** *in situ* et la mesure obtenue par la **méthode de référence**.

Erreur = comparaison à une « valeur vraie » (étauon); elle exprime l'incertitude.

Écart = comparaison à une « valeur de référence », obtenue par une méthode de référence reconnue.

Appareil de référence :

Appareil de mesure de la vitesse, de la pression, de l'intensité d'un courant électrique ou de tout autre paramètre dont la variation peut être directement mise en corrélation avec le débit d'écoulement de l'eau.

Cet appareil **étalonné** (sur bancs d'étalonnage et par un **organisme certifié**) annuellement ou lorsqu'un dérèglement est soupçonné confère à l'appareil de référence une **valeur de référence** qui pourra être comparée avec la **valeur mesurée** par le **système de mesure** *in situ* dans le but de vérifier si l'écart obtenu respecte l'**écart maximal toléré**.

Méthode de référence :

Méthode de mesure de débit permettant d'obtenir de façon ponctuelle le débit de l'écoulement, indépendamment d'une structure hydraulique.

Les méthodes de référence reconnues par le Ministère dans le cadre d'une vérification de l'exactitude sont les méthodes d'exploration du champ des vitesses, de dilution d'un traceur, volumétrique, utilisant la capacité de la pompe ou l'appareil de référence.

Valeur mesurée :

Valeur d'une grandeur représentant un résultat de mesure.

Au cours d'une **vérification de l'exactitude**, les **essais** effectués permettent d'établir le **débit d'essai** qui sert de **valeur de référence**.

Essai : Série d'opérations permettant d'obtenir une **valeur de référence** dans le cadre de la **vérification de l'exactitude**. Une **vérification de l'exactitude** est généralement composée de plus d'un essai.

Débit d'essai : Débit moyen obtenu pendant un **essai**, à partir de la **méthode de référence**.

Préalablement à sa mise en fonction ou lorsqu'un dérèglement est constaté, un **appareil de mesure** ou **de référence** peut faire l'objet d'un ajustage ou d'un étalonnage.

Ajustage (réglage) : Opération réalisée sur un **appareil** ou un **système de mesure** pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer.

À ne pas confondre avec l'étalonnage.

Exemples d'ajustage d'un système de mesure : réglage du zéro, réglage de décalage, réglage d'étendue.

Étalonnage : Processus consistant à comparer et à corriger la réponse d'un appareil de mesure avec un calibre ou un **éalon** de mesure pour toute l'**étendue de mesure**. Peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage.

Un appareil étalonné n'est pas nécessairement juste, mais l'étalonnage permet de connaître l'**erreur** de l'appareil et de la compenser avec une correction.

À ne pas confondre avec le terme calibrage, qui fait référence au terme anglais « *calibration* ».

Exemple 1 : un moulinet rotatif étalonné par le Service national d'étalonnage permettant d'établir l'incertitude de l'hélice et d'établir l'équation de mesure de la vitesse.

Exemple 2 : l'étalonnage d'un canal jaugeur en traçant une courbe hauteur – débit pour toute l'**étendue de mesure** du canal. Pour être représentative, la courbe devrait théoriquement être faite pour chaque hauteur d'eau admissible au canal.

Éalon : Réalisation de la définition d'une **grandeur** donnée, avec une valeur déterminée et une **incertitude** de mesure associée, utilisée comme référence. La « réalisation de la définition d'une grandeur donnée » peut être fournie par

un système de mesure, une mesure matérialisée ou un matériau de référence.

Exemple : une masse étalon de 1 kg avec une incertitude type associée de 0,0000003 kg.

L'étalon primaire est établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet choisi par convention. Il possède les plus hautes qualités métrologiques. Sa valeur est acceptée sans référence à d'autres étalons de la même grandeur dans un contexte spécifié.

Exemple : un banc d'étalonnage reconnu par l'un des organismes accrédités par le Conseil canadien des normes (CCN) tel que l'Association canadienne de normalisation (CSA) ou par le Bureau de normalisation du Québec (BNQ).

L'étalon secondaire est, pour sa part, établi par l'intermédiaire d'un **étalonnage** par rapport à un **étalon primaire** d'une grandeur de même nature.

Exemple : l'hélice d'un moulinet.

À ne pas confondre avec la vérification de la réponse d'un appareil de référence sur un banc d'essai. Étant donné qu'il n'y a pas de correction de l'erreur de mesure de l'appareil, il ne s'agit pas d'un étalonnage.

Organisme certifié : Lié à une référence nationale ou internationale (ISO, BNQ, etc.).

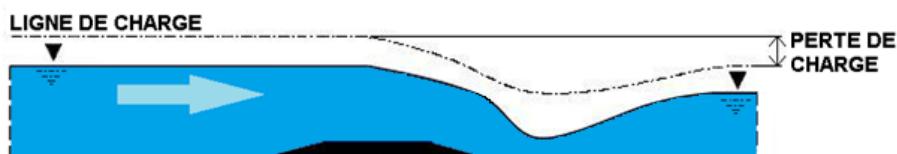
ANNEXE 2 : CONCEPT DE CHARGE PARTIELLE ET TOTALE

La charge totale d'un écoulement peut se définir comme étant sa capacité à circuler plus ou moins facilement ou librement dans une conduite découverte ou fermée.

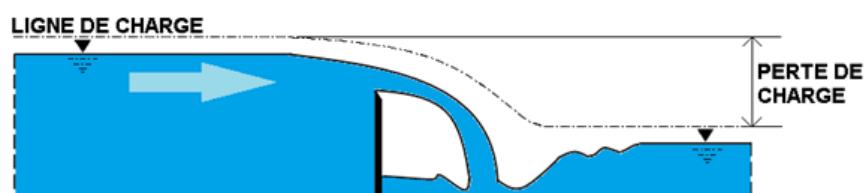
Cette capacité à circuler se traduit pour une conduite découverte par la hauteur du niveau d'eau et par la vitesse d'écoulement qui s'installent dans la conduite, alors que pour une conduite fermée, cela se mesure par la pression et la vitesse qui s'installent dans la conduite.

La charge totale optimale dans une conduite s'observe lorsque l'écoulement n'est soumis à aucune contrainte physique. Les caractéristiques physiques de l'écoulement demeurent sensiblement identiques d'une section à l'autre de la conduite considérée. Cette situation représente les conditions de référence. Ainsi, lorsque l'écoulement est modifié ou perturbé, la charge totale dans la conduite est également modifiée et la différence observée entre les deux situations indique qu'il se produit une perte de charge.

Par exemple, l'installation d'un déversoir triangulaire dans une conduite découverte entraîne un rehaussement du niveau d'eau et une diminution de la vitesse d'écoulement dans la section en amont du déversoir. Dans ce cas, l'évaluation de la perte de charge correspond à la différence du niveau d'eau qui s'observe entre les sections amont et aval du déversoir. Pour une installation, la perte de charge maximale correspond à la hauteur maximale, et donc au débit maximal. L'élaboration graphique de la courbe représentative de la charge totale en fonction de la distance horizontale mesurée dans le sens de l'écoulement permet de visualiser la ligne de charge de l'installation. Les figures suivantes permettent de comprendre ce concept.



Canal jaugeur



Déversoir

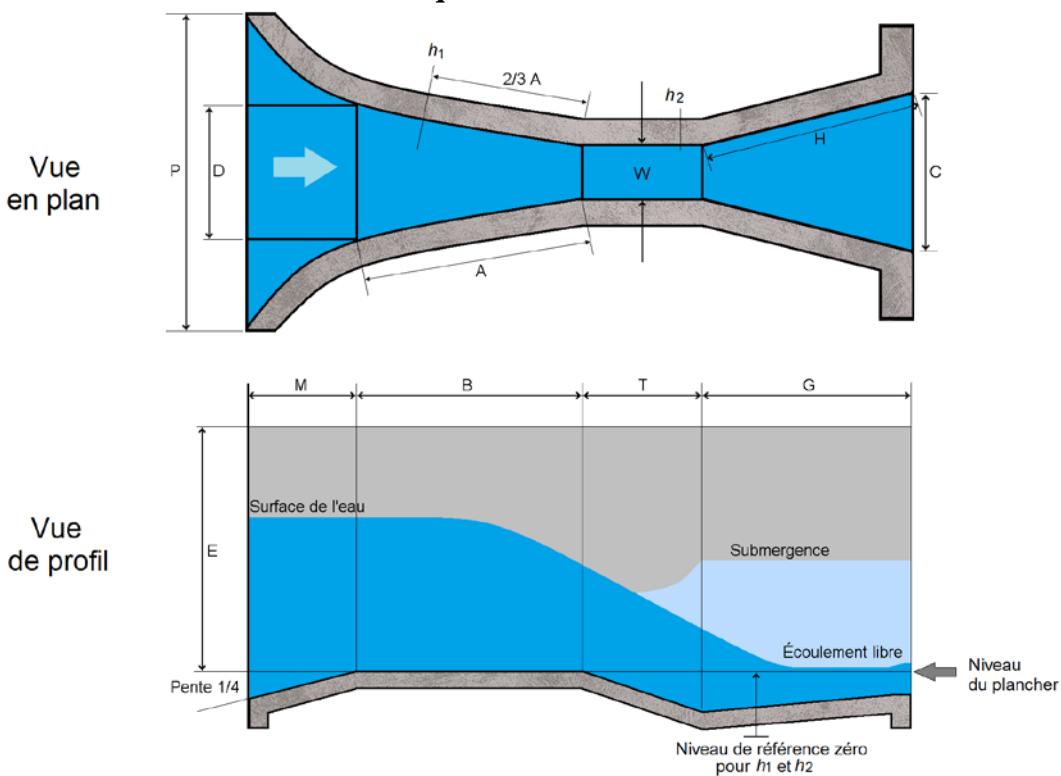
ANNEXE 3 : EXEMPLES DE GRILLES D'INSPECTION POUR ÉLÉMENTS PRIMAIRE ET SECONDAIRE

- 3.1 Grille d'inspection pour un canal Parshall
- 3.2 Grille d'inspection pour un canal Palmer-Bowlus
- 3.3 Grille d'inspection pour un canal en H
- 3.4 Grille d'inspection pour un déversoir en mince paroi
- 3.5 Grille d'inspection pour un déversoir à seuil épais
- 3.6 Grille d'inspection pour un élément secondaire
- 3.7 Grilles d'inspection pour un système de mesure dans une conduite fermée

Annexe 3.1 – Grille d’inspection pour un canal Parshall

Critères	Conforme	Non conforme
Dimension du canal		
Installation accessible (ex. : éviter de recouvrir la structure d'un plancher de béton, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table hauteur – débit et équation appropriées au canal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intervalle de débit habituellement mesuré (20-80 % de sa capacité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dimensions standard (selon croquis page suivante)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du canal Parshall par rapport à la conduite (idéalement centrée)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de l'installation selon les normes et les spécifications du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niveau transversal, longitudinal ou vertical (parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étanchéité (canal Parshall et canal d'approche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État du canal (ex. : déformation du fond, des parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Propreté des parois, du fond et de la gorge (ex. : propre, accumulation de dépôts)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Localisation du point de mesure (2/3A) et position par rapport au canal (ex. : centré, en bordure de la paroi)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence et conformité de l'échelle limnimétrique au point de mesure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement au point de mesure (ex. : dans un puits de mesurage, directement dans le canal, hauteur d'eau variable et lecture difficile, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absence de mousse ou de vapeur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal d'approche (de 5 à 10D recommandée) et description (ex. : coude à 10 m en amont, insertion de la conduite d'aménée, présence de sondes de mesure, pente provoquant un ressaut ou une trop grande vitesse, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement amont (ex. : laminaire, calme, turbulent, vague, préférentiel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description et longueur du canal de sortie (ex. : coude à 1 m en aval, présence de sondes de mesure, pente permettant l'évacuation rapide de l'eau, présence de végétation, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement aval (ex. : libre, chute, submergé)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rapport de submersion h_2/h_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence inspections et entretiens (selon exigence, recommandée 1x/mois ou +)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l'exactitude de l'élément primaire à l'aide d'une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthode appliquée pour la vérification de l'exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d'un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résultats de la vérification de l'exactitude et conformité avec l'écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Croquis canal Parshall



Correspondance des lettres

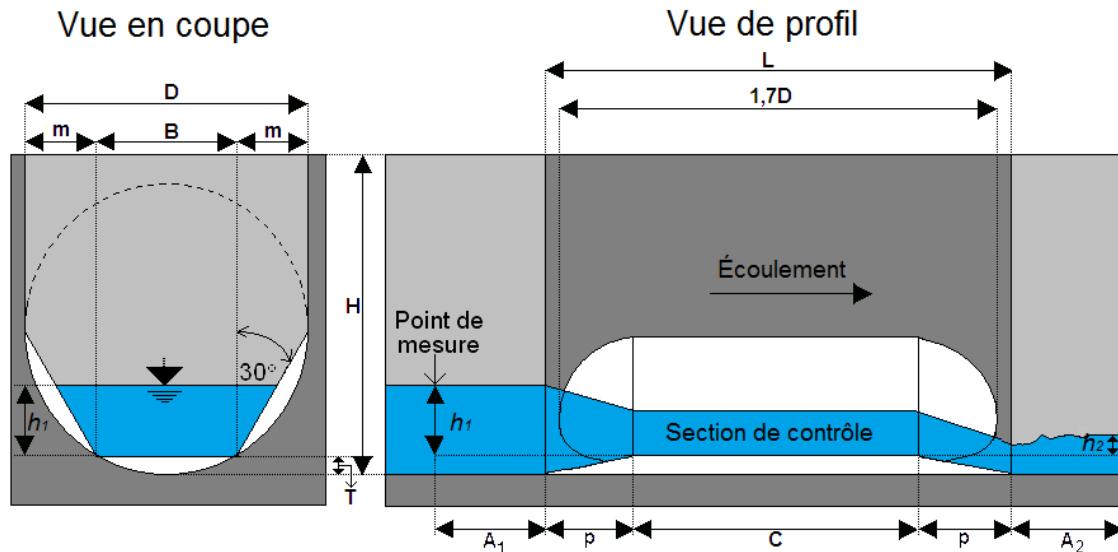
Canal d'approche	M P	Longueur de la pente à l'entrée du canal Parshall Largeur du canal d'approche
Section convergente	D E A $2/3A$ h_1 B	Largeur de l'entrée de la section convergente Hauteur du canal à la section convergente Longueur de la paroi de la section convergente Longueur mesurée à partir de l'étranglement Hauteur d'eau en amont (h_a) Longueur de la section convergente
Section de contrôle	T W h_2	Longueur de la section de contrôle Largeur de la section de contrôle (dimension du canal) Hauteur d'eau en aval (h_b)
Section de dérive	C G H	Largeur de la sortie de la section de dérive Longueur de la section de dérive Longueur de la paroi de la section de dérive

Dimensions (m)	Canal d'approche		Section convergente					Section de contrôle		Section de dérive		
	M	P	A	$2/3A$	B	D	E	T	W	C	G	H
Standard												
Mesurées												

Annexe 3.2 – Grille d’inspection pour un canal Palmer-Bowlus

Critères	Conforme	Non conforme
Dimension du canal		
Installation accessible (ex. : éviter de recouvrir la structure d'un plancher de béton, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table hauteur – débit et équation appropriées au canal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intervalle de débit habituellement mesuré (70 % de sa capacité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dimensions standard (selon croquis page suivante)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du canal Palmer-Bowlus par rapport à la conduite (idéalement centrée)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de l’installation selon les normes et les spécifications du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niveau transversal, longitudinal ou vertical (parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étanchéité (canal Palmer-Bowlus et canal d’approche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État du canal (ex. : déformation du fond, des parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Propreté des parois, du fond et de la gorge (ex. : propre, accumulation de dépôts)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Localisation du point de mesure (D/2 amont et D/6 par rapport au fond) et position par rapport au canal (ex. : centré, en bordure de la paroi)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence et conformité de l’échelle limnimétrique au point de mesure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement au point de mesure (ex. : dans un puits de mesurage, directement dans le canal, hauteur d’eau variable et lectures difficiles, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absence de mousse ou de vapeur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal d’approche (25D recommandée) et description (ex. : coude à 10 m en amont, insertion de la conduite d’amenée, présence de sondes de mesure, pente provoquant un ressaut ou une trop grande vitesse, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement amont (ex. : laminaire, calme, turbulent, vague, préférentiel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal de sortie (de 5 à 20D recommandée) et description (ex. : coude à 1 m en aval, présence de sondes de mesure, pente permettant l’évacuation rapide de l’eau, présence de végétation, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement aval (ex. : libre, chute, submergé)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rapport de submersion $h_2/h_1 (< 85 \%)$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence inspections et entretiens (selon exigences, recommandée 1x/mois ou +)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l’exactitude de l’élément primaire à l’aide d’une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthode appliquée pour la vérification de l’exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d’un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résultats de la vérification de l’exactitude et conformité avec l’écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Croquis canal Palmer-Bowlus



Correspondance des lettres

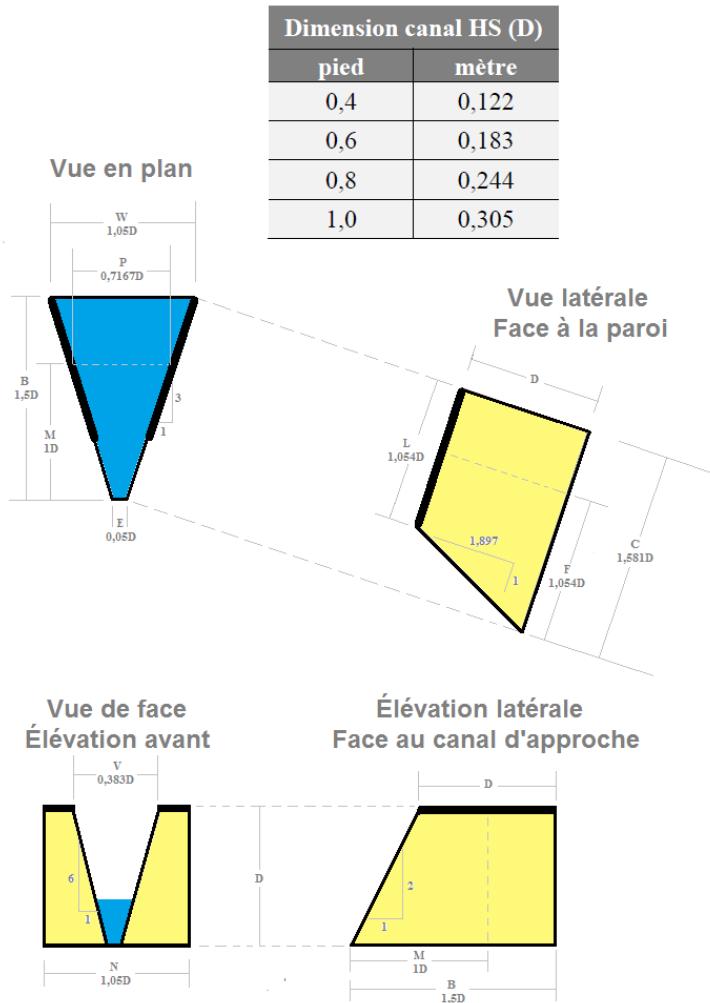
A₁	Longueur permettant de localiser le point de mesure h_1 ($D/2$)
A₂	Longueur permettant de localiser le point de mesure h_2 ($D/2$)
B	Largeur de la base de la section de contrôle du canal ($D/2$)
C	Longueur de la gorge du canal (correspond à la taille du canal)
D	Largeur du canal (correspond à la taille du canal)
H	Hauteur du canal ($D + 0,0508$ m environ) (ou 2 po environ)
L	Longueur totale de la base du canal ($2D + 0,0508$ m environ) (ou 2 po environ)
m	Distance entre la base et les côtés ($D/4$)
p	Longueur des sections d'entrée et de sortie ($D/2$)
T	Différence de hauteur entre la base de la section de contrôle du canal et le radier de la conduite ($D/6$) (correspond au zéro de référence de h_1 et de h_2)

Dimensions (m)	A ₁	A ₂	B	C	D	H	L	m	p	T
Standard										
Mesurées										

Annexe 3.3 – Grille d’inspection pour un canal en H

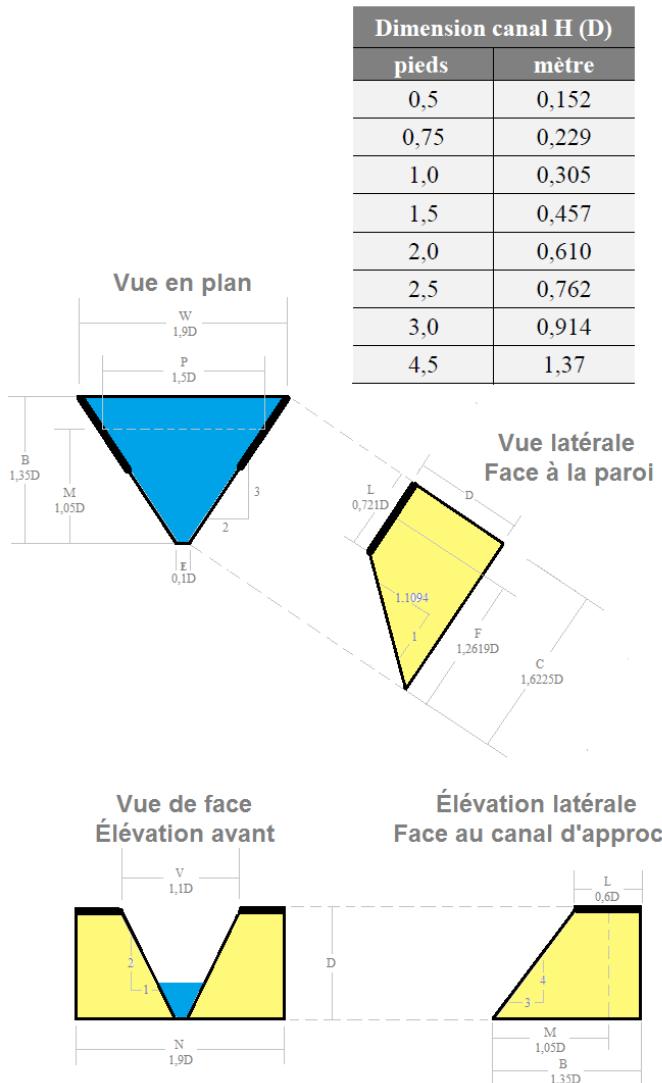
Critères	Conforme	Non conforme
Dimension du canal		
Installation accessible (ex. : éviter de recouvrir la structure d'un plancher de béton, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table hauteur – débit et équation appropriées au canal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intervalle de débit habituellement mesuré (70-100 % de sa capacité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Types (HS, H, HL) et dimensions standard (selon croquis pages suivantes)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du canal en H par rapport à la conduite (idéalement centrée)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Conformité de l'installation selon les normes et les spécifications du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niveau transversal, longitudinal ou vertical (parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étanchéité (canal en H et canal d'approche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État du canal (ex. : déformation du fond, des parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Propreté des parois, du fond et de la gorge (ex. : propre, accumulation de dépôts)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Localisation du point de mesure (h_1) et position par rapport au canal (ex. : centré, en bordure de la paroi)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence et conformité de l'échelle limnimétrique au point de mesure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement au point de mesure (ex. : dans un puits de mesurage, directement dans le canal, hauteur d'eau variable et lecture difficile, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absence de mousse ou de vapeur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal d'approche (de 3 à 5D recommandée) et description (ex. : coude à 10 m en amont, insertion de la conduite d'aménée, présence de sondes de mesure, pente provoquant un ressaut ou une trop grande vitesse, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement amont (ex. : laminaire, calme, turbulent, vague, préférentiel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description et longueur du canal de sortie (ex. : coude à 1 m en aval, présence de sondes de mesure, pente permettant l'évacuation rapide de l'eau, présence de végétation, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l'écoulement aval (ex. : libre, chute, submergé)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rapport de submersion h_2/h_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence inspections et entretiens (selon exigence, recommandée 1x/mois ou +)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l'exactitude de l'élément primaire à l'aide d'une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthode appliquée pour la vérification de l'exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d'un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résultats de la vérification de l'exactitude et conformité avec l'écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Canal HS



Identification et description des sections du canal		Dimensions standard	Dimensions mesurées
A	Longueur du canal d'approche		
B	Longueur de la base du canal (dans l'axe du canal)		
C	Longueur de la base du canal (par rapport à la paroi)		
D	Hauteur du canal (correspond à la dimension du canal)		
E	Largeur de la base de la section de contrôle, à la sortie du canal		
F	Emplacement du point de mesure (par rapport à la paroi)		
L	Longueur du sommet des parois		
M	Emplacement du point de mesure (dans l'axe du canal)		
N	Largeur totale du canal (dans l'axe du canal)		
P	Largeur de la base au point de mesure		
V	Largeur de la section de contrôle à son sommet		
W	Largeur du canal d'approche		

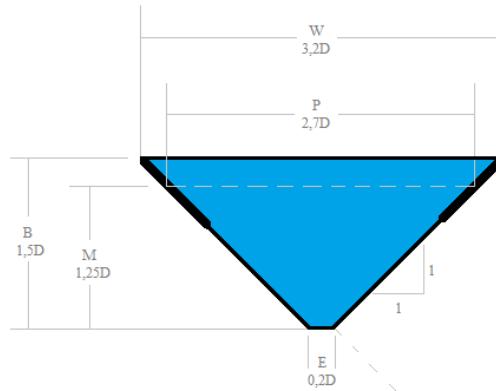
Canal H



Identification et description des sections du canal		Dimensions standard	Dimensions mesurées
A	Longueur du canal d'approche		
B	Longueur de la base du canal (dans l'axe du canal)		
C	Longueur de la base du canal (par rapport à la paroi)		
D	Hauteur du canal (correspond à la dimension du canal)		
E	Largeur de la base de la section de contrôle, à la sortie du canal		
F	Emplacement du point de mesure (par rapport à la paroi)		
L	Longueur du sommet des parois		
M	Emplacement du point de mesure (dans l'axe du canal)		
N	Largeur totale du canal (dans l'axe du canal)		
P	Largeur de la base au point de mesure		
V	Largeur de la section de contrôle à son sommet		
W	Largeur du canal d'approche		

Canal HL

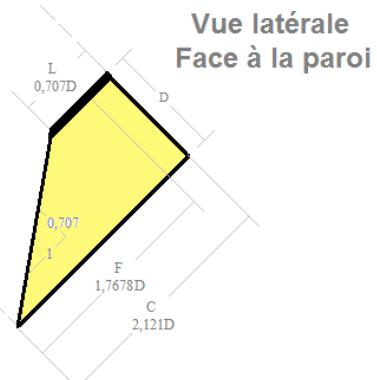
Vue en plan



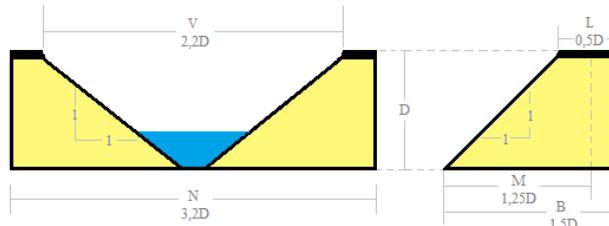
Dimension canal HL (D)

pieds	mètre
2,0	0,610
2,5	0,762
3,0	0,914
3,5	1,07
4,0	1,219

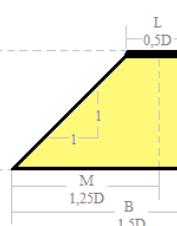
**Vue latérale
Face à la paroi**



**Vue de face
Élévation avant**



**Élévation latérale
Face au canal d'approche**



Identification et description des sections du canal		Dimensions standard	Dimensions mesurées
A	Longueur du canal d'approche		
B	Longueur de la base du canal (dans l'axe du canal)		
C	Longueur de la base du canal (par rapport à la paroi)		
D	Hauteur du canal (correspond à la dimension du canal)		
E	Largeur de la base de la section de contrôle, à la sortie du canal		
F	Emplacement du point de mesure (par rapport à la paroi)		
L	Longueur du sommet des parois		
M	Emplacement du point de mesure (dans l'axe du canal)		
N	Largeur totale du canal (dans l'axe du canal)		
P	Largeur de la base au point de mesure		
V	Largeur de la section de contrôle à son sommet		
W	Largeur du canal d'approche		

Annexe 3.4 – Grille d’inspection pour un déversoir en mince paroi

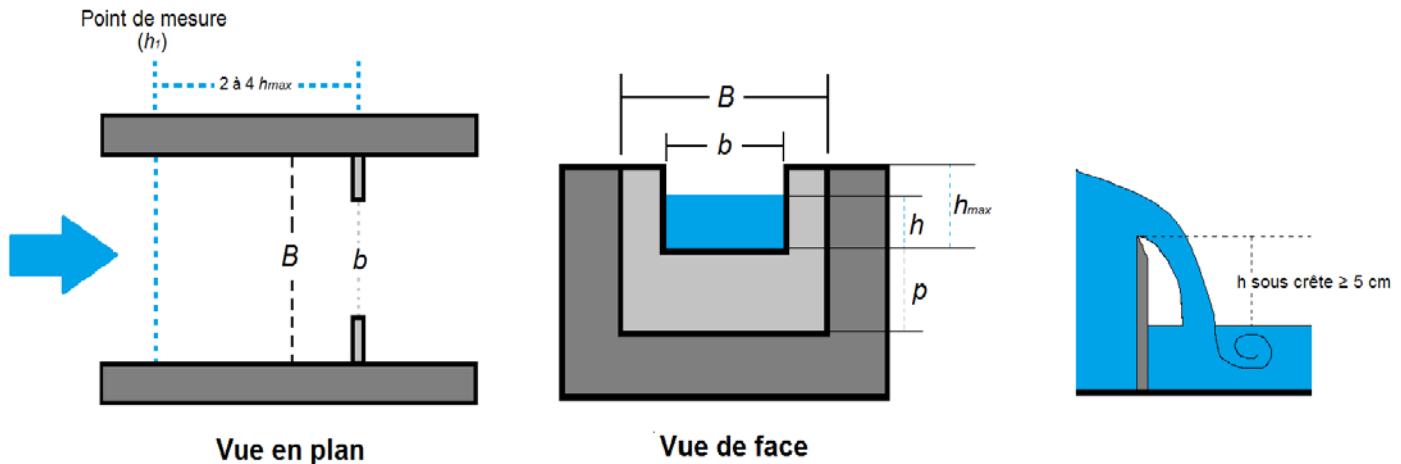
Critères	Conforme	Non conforme
Installation accessible (ex. : éviter de recouvrir la structure d'un plancher de béton, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type (rectangulaire, triangulaire, sans contraction, etc.) et dimensions standard (selon croquis)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table hauteur – débit et équation appropriées au déversoir (selon limites d’application)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intervalle de débit habituellement mesuré (max. \leq 70-100 % de sa capacité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hauteurs d'eau minimale (h_{min}) et maximale (h_{max})	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du déversoir perpendiculaire par rapport aux parois du canal et à l’écoulement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de la plaque déversante (rigide, sans corrosion, épaisseur 1-2 mm ou bordure chanfreinée d'un angle minimal de 45° du côté aval)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de la crête (ex. : de niveau sur toute sa longueur, lisse, arête vive à son intersection avec la face amont de la plaque du déversoir)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État du déversoir (ex. : déformation du fond, des parois, plaque lisse sans irrégularités)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position de l'échancrure (symétrique et équidistante par rapport aux parois du canal d'écoulement)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de l'installation selon les normes et les spécifications du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niveau transversal, longitudinal ou vertical	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étanchéité (déversoir et canal d'approche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Propreté du déversoir et de l'échancrure (ex. : propre, accumulation de dépôts)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Localisation du point de mesure (de 2 à 4 h_{max}) et position par rapport au canal d'approche (ex. : centré, en bordure de la paroi)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence et conformité de l'échelle limnimétrique au point de mesure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement au point de mesure (ex. : dans un puits de mesurage, directement dans le canal, hauteur d'eau variable et lecture difficile, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absence de mousse ou de vapeur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence d'une ventilation sous la nappe et hauteur d'eau aval \geq 5 cm sous la crête	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal d'approche (5x la largeur de la nappe d'eau) et description (ex. : sans obstruction, coude 1 m en amont, présence de sondes de mesure, pente provoquant une trop grande vitesse, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement amont (ex. : laminaire, calme, turbulent, vague, préférentiel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description et longueur de la section aval (ex. : coude à 1 m en aval, présence de sondes de mesure, pente permettant l’évacuation rapide de l'eau, présence de végétation, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement aval (ex. : libre, chute, submergé)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence inspections et entretiens (selon exigence, recommandée 1x/mois ou plus) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l'exactitude de l'élément primaire à l'aide d'une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Critères	Conforme	Non conforme
Méthode appliquée pour la vérification de l'exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d'un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résultats de la vérification de l'exactitude et conformité avec l'écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

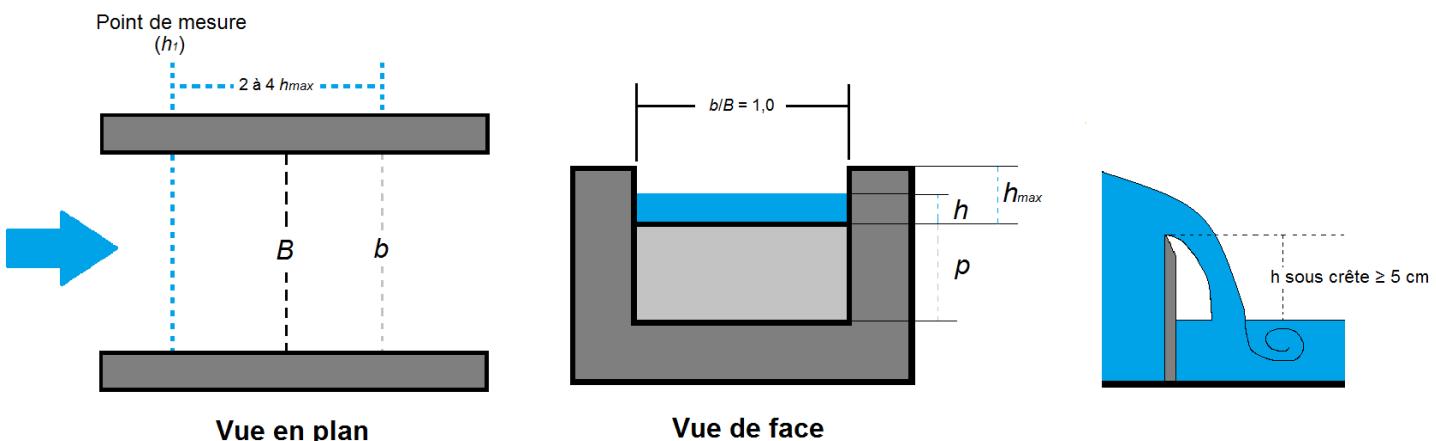
Annexe 3.5 – Grille d’inspection pour un déversoir à seuil épais

Critères	Conforme	Non conforme
Installation accessible (ex. : éviter de recouvrir la structure d'un plancher de béton, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type (rectangulaire) et dimensions standard (selon croquis pages suivantes) (<i>pour les autres formes, se référer à ISO pour compléter la grille terrain</i>)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table hauteur – débit et équation appropriées au déversoir (selon limites d’application)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intervalle de débit habituellement mesuré	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hauteurs d'eau minimale (h_{min}) et maximale (h_{max})	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du déversoir perpendiculaire par rapport aux parois du canal et à l’écoulement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État du déversoir (ex. : déformation du fond, des parois)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de la crête (surface plane, sans déformation, face amont comportant un angle droit vif à son intersection avec la partie plane de la crête)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position de l'échancrure (symétrique et équidistante par rapport aux parois du canal d’écoulement)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de l’installation selon les normes et les spécifications du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niveau transversal, longitudinal ou vertical	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étanchéité (déversoir et canal d’approche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Propreté du déversoir et de l'échancrure (ex. : propre, accumulation de dépôts)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Localisation du point de mesure (de 3 à 4 h_{max}) et position par rapport au canal d’approche (ex. : centré, en bordure de la paroi)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence et conformité de l'échelle limnimétrique au point de mesure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement au point de mesure (ex. : dans un puits de mesurage, directement dans le canal, hauteur d'eau variable et lecture difficile, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absence de mousse ou de vapeur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Présence d'une ventilation sous la nappe ou canal rectangulaire aval = largeur déversoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur du canal d’approche (5x la largeur de la nappe d'eau) et description (ex. : sans obstruction, coude 1 m en amont, présence de sondes de mesure, pente provoquant une trop grande vitesse, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement amont (ex. : laminaire, calme, turbulent, vague, préférentiel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description et longueur de la section aval (ex. : coude à 1 m en aval, présence de sondes de mesure, pente permettant l’évacuation rapide de l’eau, présence de végétation, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Description de l’écoulement aval (ex. : libre, chute, submergé)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence inspections et entretiens (selon exigence, recommandée 1x/mois ou +)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l’exactitude de l’élément primaire à l'aide d'une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthode appliquée pour la vérification de l’exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d'un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

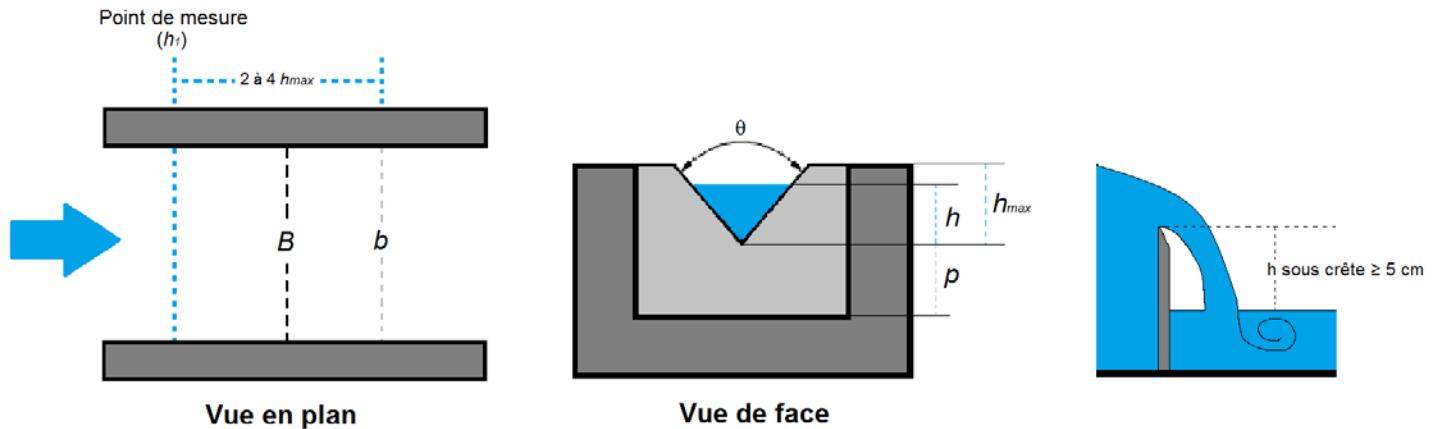
Critères	Conforme	Non conforme
Résultats de la vérification de l'exactitude et conformité avec l'écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



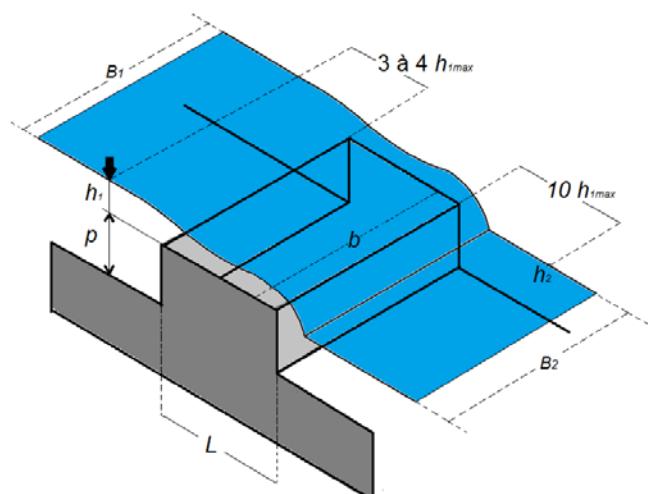
Déversoir rectangulaire						
Dimensions (m)	B	b	p	h_{max}	h_I	h sous crête
Standard						
Mesurées						



Déversoir sans contraction latérale						
Dimensions (m)	B	b	p	h_{max}	h_I	h sous crête
Standard						
Mesurées						



Déversoir sans contraction latérale							
Dimensions (m)	B	b	p	h_{max}	h_1	h sous crête	angle
Standard							
Mesurées							



Légende

- B_1 Largeur du canal d'approche (m)
- B_2 Largeur du canal de sortie (m)
- b Largeur de la crête du déversoir perpendiculaire à la direction de l'écoulement (m)
- h_1 Point de mesure amont de la hauteur d'eau (m)
- h_2 Point de mesure aval de la hauteur d'eau (m)
- L Longueur du déversoir dans le sens de l'écoulement (m)
- p Hauteur du déversoir (différence entre le niveau du fond du canal et le niveau de la crête) (m)

Déversoir rectangulaire à seuil épais								
Dimensions (m)	B_1	B_2	b	L	p	h_{max}	h_1	h_2
Standard								
Mesurées								

Annexe 3.6 – Grille d’inspection pour un élément secondaire

Critères	Conforme	Non conforme
Installation accessible	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type d’élément secondaire (ex. : bulle à bulle, ultrasonique, pression, etc.)		
Marque et modèle de l’appareil		
Formule de conversion programmée à l’appareil (relation hauteur – débit)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étendue de mesure programmée à l’appareil (min. et max.) et correspondant avec l’étendue de mesure de l’élément primaire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Affichage local (unité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence de la mesure (ex. : hebdomadaire, en continu 1 mesure/minute, etc.) et correspondance avec les exigences de suivi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthodes d’enregistrement du débit (ex. : graphique, transmission au système informatique, local avec carte mémoire, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Période d’enregistrement du débit (ex. : 8 h-8 h, 0 h-24 h, etc.) si applicable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence des inspections et des vérifications de l’exactitude de la mesure de l’appareil (selon exigence, recommandée 1x/semaine ou +) et de la transmission des données (si applicable)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Procédure de vérification de l’exactitude de la mesure de l’appareil	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Procédure de vérification de l’exactitude de la transmission des données	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Écart d’intervention fixé pour le réglage de l’appareil (selon exigence, le plus près possible de 0 % et en tout temps $\leq 5\%$ d’écart sur le débit)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Écart d’intervention fixé pour le réglage de la transmission des données (selon exigence, le plus près possible de 0 % d’écart)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vérification de l’exactitude de l’élément secondaire lors du contrôle (données brutes disponibles dans le tableau suivant)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vérification de l’exactitude lors du contrôle							
Heure	Appareil <i>in situ</i>			Mesures manuelles		Écart (%)	
	Hauteur (unité)	Débit (unité)	Système informatique (unité)	Hauteur (unité)	Débit (unité)	Débit (manuel/appareil) ($\leq 5\%$) (unité)	Transmission (appareil/système informatique) (le + près de 0 %) (unité)

Annexe 3.7 – Grille d’inspection pour un système de mesure dans une conduite fermée

Critères	Conforme	Non conforme
Installation accessible :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type (ex. : électromagnétique, ultrasonique, diaphragme, insertion, externe, etc.) :		
Marque et modèle :		
Étendue de mesure programmée à l’appareil (min. et max.) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Affichage (unité) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence de la mesure (ex. : hebdomadaire, en continu 1 mesure/minute, etc.) et correspondance avec les exigences de suivi :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthodes d’enregistrement du débit (ex. : graphique, transmission au système informatique, local avec carte mémoire, etc.) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Période d’enregistrement du débit (ex. : 8 h-8 h, 0 h-24 h, etc.) si applicable :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dimension du diamètre nominal (DN) du débitmètre et de la conduite :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Matériau de la conduite :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Position du débitmètre (selon exigence) : horizontal <input type="checkbox"/> vertical <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Direction de l’écoulement (selon exigence) : ascendant <input type="checkbox"/> descendant <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Capacité de la conduite : pleine <input type="checkbox"/> non pleine <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
État de la conduite et du débitmètre (ex. : présence de rouille, en bon état, etc.) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conformité de l’installation selon les normes et les recommandations du fabricant (inclure les spécifications techniques) (ex. : conductivité, éviter vibrations excessives, etc.) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur amont du débitmètre sans élément perturbateur, type d’élément perturbateur (ex. : coude, valve, etc.) et comparaison avec les exigences du fabricant :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Longueur en aval du débitmètre sans élément perturbateur, type d’élément perturbateur (ex. : coude, valve, etc.) et comparaison avec les exigences du fabricant :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquence des inspections et des vérifications de l’exactitude de la mesure de l’appareil (selon exigence, recommandée 1x/mois ou +) et de la transmission des données (si applicable) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Procédure de vérification de l’exactitude de la mesure de l’appareil :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Procédure de vérification de l’exactitude de la transmission des données :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Écart d’intervention fixé pour le réglage de la transmission des données (selon exigence, le plus près possible de 0 % d’écart) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Registre et durée de conservation (selon exigence) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Date de la plus récente vérification de l’exactitude à l’aide d’une méthode de référence et respect de la fréquence en fonction des exigences (ex. : 1x/an) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Méthode appliquée pour la vérification de l’exactitude (méthode de référence reconnue selon le Ministère : dilution d’un traceur, exploration du champ des vitesses, volumétrique, capacité de la pompe, appareil de référence) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résultats de la vérification de l’exactitude et conformité avec l’écart maximal toléré (ex. : écart maximal de 10 %) :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

N. B. : Joindre un croquis ou des photographies annotées de l’installation

ANNEXE 4 : EXEMPLES DE GRILLES TERRAIN POUR LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'UNE POMPE

Critères	Détails
Généralités	
Date de la vérification	
Nom et titre du vérificateur	
Emplacement du site (ex. : nom de l'entreprise, de la municipalité)	
Désignation de l'effluent (ex. : EFF-1- Effluent final n° 1)	
Type d'effluent (ex. : eau potable, eaux usées municipales, eaux usées industrielles)	
Description des exigences de suivi (ex. : mesure hebdomadaire, en continu), écart maximal toléré (ex. : 10 %) et référence (ex. : règlement, autorisation, directive)	
Capacité théorique de la pompe	
Date de la dernière détermination de la capacité de la pompe et capacité calculée	
Description de l'installation de mesure <i>in situ</i>	
Description des caractéristiques de l'installation : Poste de pompage, bassin, etc. Isolé ou non isolé Humide ou sec Nombre de pompes Numéro de série de la ou des pompes Fonctionnement (en alternance, simultané, séquentiel) Vitesses de la ou des pompes (constante ou autre) Localisation des pompes (intérieur ou extérieur du poste de pompage) Présence et état des clapets de retenue Sonde de mesure de niveau d'eau et exactitude Diamètre des conduites	
Description du système de transmission des données (ex. : enregistreur, système informatique, etc.)	
Méthode de détermination de la capacité de la pompe – Généralités	
Type de poste de pompage	<input type="checkbox"/> isolé <input type="checkbox"/> non isolé
Étanchéité des clapets de retenue sur la conduite de refoulement de la pompe (pour éviter un retour d'eau dans le poste de pompage)	

Critères	Détails
Calcul du débit de remontée (si poste non isolé) (Q_r)	Hauteur de remontée (h_r) : Temps de remontée (t_r) : Volume de remontée (V_r) :
Constance de Q_r pendant les essais (si poste non isolé)	
Essais effectués à régime permanent	
Essais effectués à vitesse constante	
Méthode de calcul du temps et résolution	
Essais faits dans des conditions normales de fonctionnement (ex. : utilisation à la capacité habituelle de fonctionnement dans le cas d'une pompe à vitesse variable)	
Essais effectués pendant la vidange du poste et non pendant le remplissage	
Nombre d'essais (≥ 3) par mode de fonctionnement (ex. : individuel, combiné, vitesse variable)	
Présentation des données brutes	
Méthode de détermination de la capacité de la pompe – Volumétrique	
Surface du poste de pompage (A), y compris dimensions et schéma	
Description et prise en compte des éléments à retrancher	
Hauteur d'eau pompée (h) entre le début (h_d) et la fin (h_f) de chaque essai	
Volume de pompage (V) pour chaque essai	
Temps de pompage (t_p) pour chaque essai	
Méthode de détermination de la capacité de la pompe – Appareil de référence	
Type, marque et modèle	
Erreur de mesure (« précision ») ($\leq 2,5 \%$)	
Intervalle de mesure et correspondance avec les conditions <i>in situ</i> (ex. : température, pression, vitesses, conductivité, etc.)	
Date d'étalonnage (annuel), y compris le certificat d'étalonnage délivré par un organisme reconnu et l'erreur de mesure de l'appareil	

Critères	Détails
Correspondance entre les critères d'utilisation de l'appareil et les conditions <i>in situ</i> , par exemple :	
Diamètre intérieur et nature de la conduite Intervalle de mesure des vitesses Pression Longueurs amont et aval sans perturbation et type de perturbation (ex. : coude, valve, pompe, etc.) Propriétés de l'eau (turbidité, conductivité, température, etc.) Conditions d'écoulement Matériau, état, épaisseur de la conduite	
Installation temporaire de l'appareil de référence, par exemple :	
Distance par rapport à l'appareil <i>in situ</i> Installation sur une conduite de contournement Position horizontale ou verticale	
Vérification du fonctionnement de l'appareil <i>in situ</i> avant l'essai (ex. : vérification du « zéro »)	
Stabilisation de l'appareil de référence avant l'essai	
Volume de pompage (V) pour chaque essai	
Temps de pompage (t_p) pour chaque essai	
Calculs	
Calcul de la capacité réelle de la pompe (Q_p) pour chaque essai	
Écart obtenu entre les valeurs minimale et maximale au cours des trois essais (< 10 %), sinon reprise de l'essai	
Moyenne des essais retenus pour la détermination de la capacité de la pompe	
Conclusion	
Présentation des conclusions de la vérification	
Incertitudes sur la méthode et facteur de correction (si applicable)	
Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à faible débit, au débit de pointe)	
Correctifs à apporter au système de pompage et échéancier	

ANNEXE 5 : EXEMPLES DE GRILLES TERRAIN POUR LA VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE D'UN SYSTÈME DE MESURE DE DÉBIT

- 5.1 Grille terrain – Généralités
- 5.2 Grille terrain – Exploration du champ des vitesses
- 5.3 Grille terrain – Dilution d'un traceur
- 5.4 Grille terrain – Volumétrique
- 5.5 Grille terrain – Capacité de la pompe
- 5.6 Grille terrain – Appareil de référence

5.1 Grille terrain – Généralités

Critères	Détails
Généralités	
Date de la vérification	
Nom et titre du vérificateur	
Emplacement du site (ex. : nom de l'entreprise, de la municipalité)	
Désignation de l'effluent (ex. : EFF-1- Effluent final n° 1)	
Type d'effluent (ex. : eau potable, eaux usées municipales, eaux usées industrielles)	
Intervalles de mesure de débit (volume) <i>in situ</i> : minimal, maximal et moyen typiques quotidiens	
Description des exigences de suivi (ex. : mesure hebdomadaire, en continu), écart maximal toléré (ex. : 10 %) et référence (ex. : règlement, autorisation, directive)	
Date de la dernière vérification de l'exactitude et écart obtenu (%)	
Description du système de mesure <i>in situ</i>	
Conduite fermée³⁴	<p>Description de la conduite et de l'installation (y compris photos, schémas, plans, dimensions, etc.), par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> Diamètre intérieur Matériau État de la conduite (ex. : encrassement intérieur, rouille extérieure) Position horizontale ou verticale Sens de l'écoulement (ascendant ou descendant) Éléments perturbateurs amont et aval : coude, valve, pompe, etc. Longueurs amont et aval sans perturbation
	<p>Description de l'appareil <i>in situ</i>, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> Type, marque, modèle Intervalle de mesure (ex. : 0-1 000 m³/min, 0-50 °C) Unités affichées (ex. : m³/min, m³) Fréquence des mesures (ex. : 1 donnée/min) Méthode d'enregistrement (ex. : enregistreur, système informatique, carte mémoire) Fiche technique du fabricant Erreur de mesure de l'appareil (« précision »)

³⁴ L'annexe 3.7 présente un exemple de grille d'inspection pour une conduite fermée.

	Critères	Détails
Conduite découverte ³⁵	<p>Description de l'élément primaire (y compris photos, schémas, plans, dimensions, etc.), par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> Type (ex. : déversoir, Parshall, etc.) Dimensions Canal naturel, artificiel, rivière Canal rectangulaire ou circulaire Canal de forme régulière ou irrégulière Matériau du canal Localisation du point de mesure Propreté, état, etc. Niveau transversal, longitudinal ou vertical Écoulement amont (turbulence, courant préférentiel, etc.) Écoulement aval (libre ou noyé, rapport de submersion) Éléments perturbateurs amont et aval 	
	<p>Description de l'élément secondaire, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> Type (ex. : bulle à bulle, sonde ultrasonique) Marque et modèle Intervalle de mesure (ex. : 0-1 000 m³/min) Relation hauteur – débit Unités affichées (ex. : m³/min, m³) Fréquence des mesures (ex. : 1 donnée/min) Méthode d'enregistrement (ex. : enregistreur, système informatique, carte mémoire) Fiche technique du fabricant Erreur de mesure de l'appareil (« précision ») 	
	Description du système de transmission des données	

³⁵ Les annexes 3.1. à 3.5. présentent des exemples de grilles d'inspection pour des éléments primaires en conduite découverte et l'annexe 3.6. présente un exemple de grille d'inspection pour l'élément secondaire.

5.2 Grille terrain – Exploration du champ des vitesses

Critères	Détails
Caractéristiques de la section de mesurage	
Largeur de la section de mesurage	
<p>Description de l'emplacement de la mesure des vitesses (y compris schéma et photos), par exemple :</p> <p>Matériaux, pente, état et propreté</p> <p>Exempt d'accumulation de sédiments</p> <p>Fond régulier du canal</p> <p>Sans turbulences et présentant une bonne répartition de l'écoulement</p> <p>Éléments perturbateurs amont et aval : coude, valve, pompe, matériau pouvant interférer avec des lectures acoustiques, etc.</p> <p>Longueurs amont et aval libres d'obstruction : minimum 10 et 5 fois la largeur du canal</p> <p>Localisation par rapport à l'emplacement du système de mesure <i>in situ</i></p>	
Caractéristiques de l'appareil utilisé	
Type (ex. : moulinet rotatif, vélocimètre acoustique, débitmètre hauteur – vitesse Doppler, etc.)	
Marque et modèle (y compris fiche technique du fabricant)	
Erreur de mesure (« précision »)	
<p>Montage de l'appareil, par exemple :</p> <p>Montage sur perche</p> <p>Montage latéral en bordure de canal</p> <p>Montage en fond de canal</p>	
Intervalle de mesure de l'appareil et correspondance avec les conditions <i>in situ</i> (ex. : température, pression, vitesses, conductivité, hauteur, présence de glace, de mousse, de matières en suspension ou de débris flottants, etc.)	
Diamètre de l'hélice ou du capteur et conformité par rapport à la hauteur d'eau lors de l'essai	
Respect des conditions d'utilisation particulières (ex. : zone morte)	
Respect des exigences d'entretien (ex. : conservation d'une fiche de suivi des entretiens et vérifications)	

Critères	Détails
<p>Date d'étalonnage (ou de la vérification selon le cas), y compris le certificat d'étalonnage (ou attestation de conformité) délivré par un organisme reconnu, la formule de l'hélice ou la table d'étalonnage, l'erreur de mesure et le facteur de correction :</p> <p><u>Moulinet rotatif</u> : étalonnage annuel ou après 300 heures d'utilisation (selon la plus faible des deux périodes)</p> <p><u>Moulinet électromagnétique</u> : étalonnage annuel</p> <p><u>Vélocimètre acoustique</u> : étalonnage ou vérification annuel</p> <p><u>Débitmètre hauteur – vitesse Doppler et sans contact radar</u> : validation du modèle de calcul intégré à l'appareil, vérification annuelle</p>	
Déroulement de la vérification	
<p>Vérification de l'élément secondaire <i>in situ</i> préalablement à l'essai (écart $\leq 5\%$) (requis lorsque l'élément secondaire sert à établir le débit <i>in situ</i> qui sera comparé avec le débit de l'essai)</p>	
<p>Vérification du système de transmission des données <i>in situ</i> préalablement à l'essai</p>	
<p>Synchronisation des appareils avant l'essai (ex. : heure, fréquence des mesures, délai de transmission)</p>	
<p>Précautions préalables à l'essai, par exemple :</p> <p>Essai de rotation de l'hélice, vérification de l'enregistrement des rotations au compteur</p> <p>Appareil immergé dans l'écoulement pendant 10 minutes préalablement à l'essai</p> <p>Nettoyage des capteurs</p> <p>Mise à jour du logiciel d'acquisition et du micrologiciel, etc.</p>	
<p>Orientation de l'hélice ou du capteur, par exemple :</p> <p>Effet autocomposant de l'hélice</p> <p>Parallèle, perpendiculaire, contre le sens de l'écoulement</p> <p>Position du capteur (ex. : au centre du canal)</p> <p>Angle du faisceau (ex. : 20°, 45°, etc.)</p>	
<p>Nombre d'essais (1 essai si toutes les conditions sont respectées lors du 1^{er} essai, sinon 3 essais)</p>	
Mesure de la hauteur d'eau	
<p>Méthode et fréquence des mesures pendant l'essai, par exemple :</p> <p>Marque et modèle de l'appareil</p> <p>Mesure aérienne ou immergée</p> <p>Capteur de pression, ultrasonique, radar</p> <p>Capteur intégré ou externe à l'appareil</p> <p>Capteur immergé ou sans contact</p>	

Critères	Détails
<p>Hauteur d'eau suffisante pour l'utilisation de l'appareil sélectionné, par exemple :</p> <p><u>Moulinet rotatif</u> = $h \geq 4x$ diamètre de l'hélice</p> <p><u>Moulinet électromagnétique</u> = $h \geq 3x$ dimension verticale du capteur</p> <p><u>Vélocimètre acoustique Doppler</u> = $h \geq 3x$ dimension verticale du capteur</p> <p><u>Débitmètre hauteur – vitesse Doppler</u> = selon recommandations du fabricant</p>	
<p>Écart entre la hauteur d'eau la plus faible et la plus forte, par rapport à la hauteur d'eau la plus forte, pour toute la durée de l'essai, $\leq 5\%$. Si le débit ne peut être stabilisé et que la méthode est conservée, 3 essais complets sont requis</p>	
<p>Présentation des données brutes de hauteurs d'eau mesurées</p>	
Mesure de la vitesse	
<p>Méthode de mesure pendant l'essai, par exemple :</p> <p>Mécanique, acoustique, électromagnétique</p> <p>Déploiement stationnaire ou sur équipement de flottaison</p> <p>Exploration point par point (par verticale)</p> <p>Mesure de la vitesse moyenne dans un faisceau</p> <p>Modélisation basée sur une zone d'échantillonnage, etc.</p>	
<p>Position de l'appareil lors de l'essai (ex. : au niveau par rapport à la surface, parallèle au sens de l'écoulement, centré sur la section de mesurage)</p>	
<p>Superficie de la zone d'échantillonnage</p>	
<p>Nombre de récepteurs acoustiques</p>	
<p>Angle du faisceau</p>	
<p>Nombre de verticales (fixé en fonction de la largeur de la section de mesurage) et position de chacune des verticales par rapport au canal</p>	
<p>Méthode de détermination de la vitesse moyenne sur chaque verticale, par exemple :</p> <p>Méthode de distribution des vitesses</p> <p>Méthodes utilisant un nombre réduit de points (ex. : méthode en un point : $0,6H$; méthode en deux points : $0,2$ et $0,8H$, etc.)</p> <p>Méthode par intégration de vitesse</p>	

Critères	Détails
<p>Nombre de mesures de vitesse et leur durée par essai, par exemple :</p> <p><u>Moulinet</u> : 3 ou idéalement 5 mesures de vitesse d'une durée ≥ 30 secondes chacune et consécutives</p> <p><u>Débitmètre hauteur – vitesse Doppler et radar</u> : mesure en continu, minimum 1 donnée toutes les 30 secondes pendant 30 minutes</p>	
Écart entre la plus basse et la plus haute vitesse, par rapport à la plus haute vitesse, mesuré sur chaque verticale à chacun des essais (idéalement $\leq 5\%$)	
Formule de l'hélice	
Présentation des données brutes des vitesses mesurées	
Calculs	
Calcul de l'aire de la section mouillée	
Débit et volume de l'essai (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Débit et volume <i>in situ</i> (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Écart obtenu (%) pour chacun des essais et formule utilisée	
Conclusion	
Présentation des conclusions de la vérification	
Incertitudes sur la méthode et facteurs de correction (si applicables)	
Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à bas débit, au débit de pointe)	
Respect ou non des exigences lors de chacun des trois essais (ex. : écart maximal toléré de 10 %)	
Correctifs à apporter au système de mesure du débit et échéancier	

Exemple de compilation des données brutes pour un essai – Mesurage par verticale, méthodes utilisant un nombre réduit de points

Date :		Site :			Désignation de l'effluent :			Largeur de la section de mesurage (m) :				
N° essai :		Heure début essai : Hauteur (m) :			Heure fin essai : Hauteur (m) :			Durée des mesures de vitesses (secondes) :				
Numéro de verticale :		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distance par rapport au bord du canal (m) :												
Mesure des hauteurs (m)	H n°1											
	H n°2											
	H n°3											
	H n°4											
	H n°5											
	H moy (m)											
Mesure des vitesses (m/s) 0,2H	H_{min} (m) :				H_{max} (m) :				Écart (≤ 5 %) :			
	v n°1											
	v n°2											
	v n°3											
	v n°4											
	v n°5											
Mesure des vitesses (m/s) 0,6H	v moy (m/s)											
	Écart v min./max. (%)											
	v n°1											
	v n°2											
	v n°3											
	v n°4											
Mesure des vitesses (m/s) 0,8H	v n°5											
	v moy (m/s)											
	Écart v min./max. (%)											
	v n°1											
	v n°2											
	v n°3											
	v n°4											
	v n°5											
	v moy (m/s)											
	Écart v min./max. (%)											

**Exemple de compilation des données brutes pour un essai –
Mesurage de l'ensemble de la section mouillée**

Date :	Site :	Désignation de l'effluent :
N° essai :	Heure début essai :	Heure fin essai :
Mesure (1/minute)	Vitesse	Hauteur
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
Min.		
Max.		
Écart (%)		

5.3 Grille terrain – Dilution d'un traceur

Critères	Détails
Caractéristiques du bief de mesurage	
Absence d'éléments pouvant retenir le traceur Ex. : sonde de mesure, plantes herbacées, matières en suspension, etc.	
Absence de réservoir, zones mortes, apport ou fuite d'eau	
Description du bief de mesure : Point d'injection (en écoulement turbulent), point de prélèvement	
Nombre de points de prélèvement (en fonction de la largeur du canal)	
Méthode de détermination de la longueur de bon mélange (équation, colorant, etc.)	
Longueur du bief Doit permettre une dispersion verticale et latérale du traceur (environ 20x pour une conduite canalisée et 25x pour un canal naturel, la largeur du canal ou moins selon les caractéristiques de l'écoulement).	
Points d'échantillonnage transversal au canal : <input type="checkbox"/> 1 point <input type="checkbox"/> 3 points, à 1/6, 3/6 et 5/6 de la section transversale du canal : si largeur du canal > 2,4 m et parois homogènes (ex. : conduite en béton) ou si largeur du canal > 1,8 m et parois non homogènes (ex. : fossé).	
Stabilité du débit de l'écoulement (variation < 5 % entre le débit min. et le débit max.) Requise pour la méthode par intégration. Conditionnelle pour la méthode à débit constant (si le temps d'injection est prolongé et que l'intervalle de temps entre la prise des échantillons est réduit à une minute).	
Conservation des échantillons adaptée au type de traceur	
Caractéristiques générales de la méthode	
Méthode de dilution : <input type="checkbox"/> Par intégration (injection instantanée) <input type="checkbox"/> Injection à débit constant (injection en continu)	
Type de traceur utilisé : <input type="checkbox"/> Chimique (ex. : LiCl, NaCl) <input type="checkbox"/> Colorant (ex. : fluorescéine, rhodamine WT) <input type="checkbox"/> Radioactif	

Critères	Détails
Limite de détection du traceur	
Mesure en continu de la température (si mesure en continu de la conductivité)	
Description et conformité de la méthode de préparation du traceur	
<p>Détermination de la quantité de traceur et équation utilisée (section 8.5.3.2) :</p> <p>Méthode par intégration :</p> $V = \left[\frac{C_2}{C_1} Q^l (t_f - t_i) \right] 1000$ <p>Méthode à débit constant :</p> $V = (t_f - t_i + t_p) \frac{Q^l C_2}{C_1}$	
Concentration de la solution mère	
<p>Description de la méthode d'analyse des échantillons Ex. : laboratoire, sur le site, etc.</p> <p>Concentration du bruit de fond du traceur dans l'effluent (C_{bf}) Prélèvement à un endroit représentatif de la qualité de l'écoulement, sans risque de contamination par le traceur, de 3 séries de 3 échantillons d'eau de l'écoulement, soit : avant la manipulation du traceur, au cours de l'essai et à la fin de l'injection.</p> <p>Méthode de dilution par intégration (injection instantanée)</p>	
<p>Mode d'injection du traceur Injection de la quantité totale de traceur de façon instantanée à l'aide d'un contenant à large ouverture; aucune perte de traceur pendant l'injection; au centre de l'écoulement.</p> <p>Détermination de la concentration de C_1 Moyenne des 3 échantillons de 50 ml de la solution d'injection. Certificats d'analyse joints au rapport.</p>	
<p>Période d'échantillonnage pour la mesure de C_2 Doit se poursuivre pendant toute la durée du passage du traceur. Doit se poursuivre après l'estimation du temps de passage du traceur. Doit se prolonger pour au moins 3 à 4 fois le temps requis pour que la concentration maximale du traceur se produise à la section d'échantillonnage.</p>	
<p>Fréquence de prélèvement des échantillons (< 1 minute) Le temps exact de prélèvement doit être noté pour chaque échantillon.</p>	

Critères	Détails
Concentration du traceur dilué C_2 Habituellement 2 à 5 fois la concentration naturelle de l'écoulement (respect des critères d'eau de surface). Si bruit de fond élevé, un rapport $\frac{1}{2}$ fois le bruit de fond est acceptable si l'exactitude des résultats n'est pas affectée.	
Nombre d'échantillons Minimum de 30 échantillons pour tracer la courbe et pour vérifier que le traceur est complètement passé.	
Courbe de restitution de la concentration en fonction du temps (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) Récupération de la totalité de la masse de traceur injecté au point d'échantillonnage.	
Pourcentage de récupération > 95 % et conformité de la méthode de calcul Pour que l'essai avec la méthode par injection instantanée soit considéré comme valide, il faut que 95 % de la masse de traceur injectée soit récupérée, selon l'équation suivante : $\% P_{réc.} = \frac{M_{réc.}}{M_{inj.}} \times 100$ Dans le cas des canaux larges où trois courbes doivent être tracées, le taux de récupération doit être vérifié individuellement pour chacune des courbes.	
Interprétation des résultats Échantillons prélevés en 1 seul point : une courbe de la concentration en fonction du temps est tracée, mais un seul plateau servira au calcul du débit. Échantillons prélevés en 3 points (ex. : dans le cas des canaux larges) : une courbe de la concentration en fonction du temps est tracée pour chaque point de prélèvement et l'aire sous chaque courbe est mesurée. Le mélange est considéré comme uniforme lorsque les aires sous les courbes sont semblables. Une courbe moyenne est ensuite tracée à partir de ces 3 courbes. Le rejet d'une donnée requiert des justifications (ex. : justification statistique, identification d'une erreur systématique).	
Calcul du débit de l'essai, y compris l'équation et les données brutes $Q = \frac{V C_1}{\Delta t \sum(C_2 - C_{bf})} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{V C_1}{t_p (\bar{C}_2 - C_{bf})}$	
Sources et estimation statistique des erreurs	

Critères	Détails
Méthode de dilution par injection à débit constant (injection en continu)	
Mode d'injection du traceur Injection à l'aide d'un appareil dont le débit peut être ajusté et contrôlé. Éviter que la tubulure d'injection ne touche à la surface de l'eau. Éviter l'injection dans une chute.	
Débit d'injection du traceur (q) Moyenne des 3 mesures volumétriques avant essai et des 3 mesures volumétriques après essai. Contre-vérification de la constance d'injection : solution traçante placée dans un contenant gradué, niveau de la solution noté aux temps 0,2, 0,4 0,6 et 0,8 de la durée totale d'injection.	
Détermination de la concentration de C_1 Détermination de la concentration du traceur C_1 (moyenne des 3 échantillons de la solution d'injection prélevés au début et des 3 échantillons prélevés à la fin de l'essai; la différence entre chacune des 6 mesures doit être inférieure à 5 %). Les certificats d'analyse doivent être joints au rapport.	
Période d'échantillonnage pour la mesure de C_2 Temps suffisamment long pour permettre de vérifier qu'un bon mélange est obtenu et que la concentration du traceur atteint une valeur constante (plateau). Doit commencer avant que le traceur arrive à la section d'échantillonnage, et se poursuivre après que le plateau est atteint.	
Fréquence de prélèvement des échantillons 5 minutes max. à la suite de l'injection. Par la suite, à toutes les minutes lorsque le plateau est atteint. Le temps exact de prélèvement doit être noté pour chaque échantillon.	
Concentration du traceur dilué C_2 Doit atteindre un plateau stable ainsi qu'un rapport élevé du signal plateau – bruit de fond (en respect avec le milieu récepteur).	
Nombre d'échantillons Doit être suffisant pour tracer un minimum de points sur la courbe de réponse, soit 3 points sur la courbe ascendante et 9 points sur le plateau.	

Critères	Détails
<p>Interprétation des résultats</p> <p>Échantillons prélevés en 1 seul point : atteinte d'un seul plateau indiquant l'apparition d'un équilibre.</p> <p>Échantillons prélevés en 3 points (ex. : dans le cas des canaux larges) : une ligne de la concentration en fonction du temps doit être tracée pour chaque point de prélèvement. Un plateau identique pour les 3 lignes indique que le mélange est uniforme et que la durée d'injection est suffisante.</p> <p>Seules les concentrations situées sur le plateau doivent servir au calcul du débit. L'équilibre (plateau) entre les 3 points est rarement atteint au même moment, puisque les vitesses transversales d'écoulement sont différentes entre chaque point.</p> <p>Le rejet d'une donnée requiert des justifications (ex. : justification statistique, identification d'une erreur systématique).</p>	
<p>Calcul du débit de l'essai, y compris l'équation et les données brutes</p> $Q = q \left(\frac{c_1 - c_2}{c_2 - c_{bf}} \right) \quad \text{ou} \quad Q = q \frac{c_1}{c_2}$	
<p>Sources et estimation statistique des erreurs</p>	
<p>Conclusion</p> <p>Présentation des conclusions de la vérification</p> <p>Incertitudes sur la méthode et facteurs de correction (si applicables)</p> <p>Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à bas débit, au débit de pointe)</p> <p>Respect ou non des exigences lors de chacun des 3 essais (ex. : écart maximal toléré de 10 %)</p> <p>Correctifs à apporter au système de mesure du débit et échéancier</p>	

5.4 Grille terrain – Volumétrique

Critères	Détails
Déroulement de la vérification	
Vérification de l'élément secondaire <i>in situ</i> préalablement à l'essai (écart $\leq 5\%$) (requise lorsque l'élément secondaire sert à établir le débit <i>in situ</i> qui sera comparé avec le débit de l'essai)	
Vérification du système de transmission des données <i>in situ</i> préalablement à l'essai	
Emplacement de la mesure volumétrique (ex. : bout de tuyau, RBS, etc.)	
Essai en remplissage ou vidange	
Procédure appliquée (ex. : récipient gradué, sac de plastique, pesée, etc.)	
Type et caractéristiques adéquates du récipient pour les essais volumétriques, par exemple : Dimensions connues avec précision, idéalement un récipient étalonné Indéformable Permettant un remplissage sans formation de trous d'air Favorisant une vidange complète et rapide	
Volume du récipient et prise en compte des éléments à retrancher, y compris photos, schéma, plan	
Étalonnage des équipements utilisés (ex. : récipient étalonné, balance), y compris le certificat d'étalonnage	
Méthode de mesure du volume <i>in situ</i> (ex. : totalisateur permanent, débit instantané, etc.) et fréquence (si applicable)	
Méthode de mesure du niveau d'eau (ex. : règle, appareil, contenant gradué, etc.)	
Détermination du volume massique de l'effluent	
Durée des essais adaptée au débit Petit débit ($< 2 \text{ l/s}$) = 10 à 20 secondes Débit intermédiaire = idéalement 5 minutes Grand débit (réservoir) = min. 5 minutes et Δ hauteur d'eau $> 150 \text{ mm}$ Gravimétrique (pesée) = 5 minutes	
Nombre d'essais (≥ 3)	
Présentation des données brutes (hauteur, volume, etc.)	

Critères	Détails
Calculs	
Volume de l'essai (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Volume <i>in situ</i> (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Écart obtenu (%) pour chacun des essais et formule utilisée	
Conclusion	
Présentation des conclusions de la vérification	
Incertitudes sur la méthode et facteurs de correction (si applicables)	
Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à bas débit, au débit de pointe)	
Respect ou non des exigences lors de chacun des trois essais (ex. : écart maximal toléré de 10 %)	
Correctifs à apporter au système de mesure du débit et échéancier	

5.5 Grille terrain – Méthode utilisant la capacité de la pompe d'un poste de pompage

Critères	Détails
Description du poste de pompage	
Aménagement du poste de pompage Isolé ou non isolé Nombre de pompes et mode de fonctionnement (en alternance, simultané, séquentiel) Localisation des pompes Présence de conduites submergées alimentant le poste de pompage Position normale des alarmes de haut niveau et de bas niveau, s'il y a lieu Présence d'un trop-plein, et l'endroit où il se trouve dans le poste de pompage Présence et état des clapets de retenue	
Numéro de série des pompes	
Spécifications techniques théoriques de la pompe (capacité d'origine)	
Capacité réelle de la pompe (Q_p) selon le mode utilisé (ex. : isolé, combiné) et méthode servant à la déterminer (section 5)	
Déroulement de la vérification	
Vérification de l'élément secondaire <i>in situ</i> préalablement à l'essai (écart $\leq 5\%$) (requise lorsque l'élément secondaire sert à établir le débit <i>in situ</i> qui sera comparé avec le débit de l'essai)	
Vérification du système de transmission des données <i>in situ</i> préalablement à l'essai	
Fonctionnement de la ou des pompes à vitesse constante	
Fonctionnement de la ou des pompes au maximum de leur capacité	
Mesure du débit sortant du poste de pompage	
Méthode de calcul du temps (ex. : chronomètre) et résolution (ex. : 1/100 secondes)	
Durée des essais (≥ 5 minutes et Δh d'eau ≥ 150 mm)	
Nombre d'essais (≥ 3) et intervalle de temps entre les essais (totalité des essais ≤ 48 heures)	
Présentation des données brutes (hauteur, volume, etc.)	

Critères	Détails
Calculs	
Volume de l'essai (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Volume <i>in situ</i> (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Écart obtenu (%) pour chacun des essais et formule utilisée	
Conclusion	
Présentation des conclusions de la vérification	
Incertitudes sur la méthode et facteurs de correction (si applicables)	
Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à bas débit, au débit de pointe)	
Respect ou non des exigences lors de chacun des trois essais (ex. : écart maximal toléré de 10 %)	
Correctifs à apporter au système de mesure du débit et échéancier	

5.6 Grille terrain – Appareil de référence

Critères	Détails
Appareil de référence	
Type, marque et modèle	
Erreur de mesure (« précision ») ($\leq 2,5\%$)	
Intervalle de mesure et correspondance avec les conditions <i>in situ</i> (ex. : température, pression, vitesses, conductivité, etc.)	
Date d'étalonnage (annuel), y compris le certificat d'étalonnage délivré par un organisme reconnu et les facteurs de correction	
Correspondance entre les critères d'utilisation de l'appareil et les conditions <i>in situ</i> , par exemple : <ul style="list-style-type: none"> Diamètre intérieur et nature de la conduite Intervalle de mesure des vitesses Pression Longueurs amont et aval sans perturbation et type de perturbation (ex. : coude, valve, pompe, etc.) Propriétés de l'eau (turbidité, conductivité, température, etc.) Conditions d'écoulement Matériau, état, épaisseur de la conduite 	
Installation temporaire de l'appareil de référence, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> Distance par rapport à l'appareil <i>in situ</i> Installation sur une conduite de contournement Position horizontale ou verticale 	
Déroulement de la vérification	
Emplacement du capteur de l'appareil de référence (y compris schéma et photos)	
Caractéristiques de l'écoulement lors de la vérification : <ul style="list-style-type: none"> Écoulement stable et en régime permanent Vitesses min. et max. mesurées au cours de l'essai Pression, température, conductivité, turbidité, etc. 	
Vérification du fonctionnement de l'appareil <i>in situ</i> avant l'essai (ex. : vérification du « zéro »)	
Synchronisation des appareils (<i>in situ</i> et de référence) avant l'essai (ex. : heure, fréquence des mesures, délai de transmission)	
Stabilisation des appareils de référence et <i>in situ</i> avant l'essai	
Type de mesure (ex. : instantanée ou en continu, à l'aide d'un totalisateur de volumes)	
Fréquence de la prise des mesures (vitesse, débit, totalisateur) (≥ 1 donnée/min)	

Critères	Détails
Durée des essais (≥ 30 minutes consécutives)	
Nombre d'essais (≥ 3 essais) (idéalement 3 niveaux de débit : minimal [pas moins de 10 % du débit maximal], moyen et maximal)	
Calculs	
Débit et volume de l'essai (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Débit et volume <i>in situ</i> (y compris le détail des calculs et toutes les données brutes)	
Écart obtenu (%) pour chacun des essais et formule utilisée	
Conclusion	
Présentation des conclusions de la vérification	
Incertitudes sur la méthode et facteurs de correction (si applicables)	
Représentativité des résultats par rapport aux conditions normales d'écoulement (ex. : essai fait à bas débit, au débit de pointe)	
Respect ou non des exigences lors de chacun des trois essais (ex. : écart maximal toléré de 10 %)	
Correctifs à apporter au système de mesure du débit et échéancier	

Exemple de compilation des données brutes de l'appareil de référence

Date :	Site :	Désignation de l'effluent :	
Appareil :	Niveau de débit pendant l'essai :		
Essai	1	2	3
Heure début :			
Heure fin :			
Totalisateur début			
Mesure (1/minute)	Débits instantanés		
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
Totalisateur fin			
Min.			
Max.			
Écart (%)			

ANNEXE 6 : EXEMPLE D'ÉVALUATION D'UN RAPPORT DE VÉRIFICATION DE L'EXACTITUDE D'UN SYSTÈME DE MESURE DU DÉBIT³⁶

Critères	Conforme	Non conforme	Incomplet	S. O.	Commentaires
Date de la vérification	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Nom, titre et signature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Emplacement du site (ex. : nom de l'entreprise, de la municipalité)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Désignation de l'effluent (ex. : EFF-1 – Effluent final n°1)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Type d'effluent (ex. : eau potable, eaux usées municipales, eaux usées industrielles)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Référence des exigences (ex. : règlement, autorisation, directive)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description des exigences de suivi du débit (ex. : mesure hebdomadaire, en continu) et de l'écart maximal toléré (ex. : 10 %)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description du système de mesure <i>in situ</i> (éléments primaire et secondaire)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Photographies et schémas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Types, marques et modèles des équipements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description des caractéristiques techniques de l'appareil (spécifications techniques du fabricant)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dimensions du canal ou de la conduite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
État général (encrassement, déformations, fissures, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Conditions d'écoulement dans l'élément de mesure ainsi qu'en amont et en aval	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Intervalles de mesure : minimal, maximal et moyen typiques quotidiens	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Courbes et tables utilisées pour la détermination des débits	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

³⁶ Basé sur la section 12.

Critères	Conforme	Non conforme	Incomplet	S. O.	Commentaires
Description et conformité de l'installation par rapport aux recommandations du fabricant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description du système de transmission des données	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description de la méthode de vérification du système de mesure <i>in situ</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Détails de l'application de la méthode (schémas, photos, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description des appareils utilisés pour la vérification (ex. : type, marque, modèle, numéro de série, principe de fonctionnement, erreur de mesure, dimensions, intervalle de mesure et correspondance avec les conditions <i>in situ</i>)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Date d'étalonnage de l'appareil utilisé et certificat d'étalonnage délivré par un organisme reconnu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description des caractéristiques et de l'emplacement de la section de mesurage sélectionnée pour la vérification	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Description de la méthode de vérification du système de transmission des données	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présentation des résultats de vérification	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présentation des données brutes et des calculs effectués	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Valeurs (débit ou volume) obtenues par le système de mesure <i>in situ</i> et par la méthode de référence, ainsi que l'écart calculé pour chacun des essais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Certificats d'analyse (méthode avec traceur)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Interprétation des résultats	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Conclusion quant à la conformité de l'installation et à sa capacité à produire des mesures fiables, et recommandations lorsque requis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Retour sur les recommandations de la dernière vérification de l'exactitude et sur la mise en place des correctifs (lorsqu'applicable)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

*Ministère
de l'Environnement
et de la Lutte contre
les changements
climatiques*

Québec 