



PROPOSITION D'UN REFERENTIEL ET D'UNE PROCEDURE DE CONTROLE DES CANAUX JAGEURS UTILISES DANS LE DOMAINE DE L'ASSAINISSEMENT

Etude réalisée pour l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse



Date : 2024-12-19

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction	2
1.1.	Contexte	2
1.2.	Objectifs	2
2.	Etat de l'art	3
2.1.	Préambule	3
2.2.	L'état de l'art antérieur à la norme ISO 4359	3
2.3.	Norme NF ISO 4359	5
2.4.	Essais expérimentaux réalisés par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	9
2.5.	Simulations hydrauliques 3D du laboratoire ICube	11
2.6.	Approche MCERTS	12
3.	Proposition d'un protocole de mesure et d'un référentiel de contrôle	13
3.1.	Appareil de mesure	13
3.2.	Etat d'esprit des tolérances proposées	13
3.3.	Type de canaux concernés	13
3.4.	Protocole et référentiel proposés	14
3.4.1.	Identification du canal	14
3.4.2.	Etat général	14
3.4.3.	Fonctionnement hydraulique du canal	14
3.4.4.	Dimensions du canal	15
3.4.5.	Planéité du col	17
3.4.6.	Pente longitudinale et transversale du col	17
3.4.7.	Longueur du col	19
3.4.8.	Convergent amont	19
3.4.9.	Elargissement du divergent aval	20
3.4.10.	Décalages entre les côtés droit et gauche	21
3.4.11.	Longueur droite en amont du point de mesure	21
3.4.12.	Largeur du chenal d'approche	22
3.4.13.	Planéité du lit dans le chenal d'approche	22
3.5.	Mesurage de la hauteur	26
3.5.1.	Dispositif et protocole de contrôle	26
3.5.2.	Distance entre la mesure et le début du convergent	26
4.	Conclusion	27
5.	Références	27

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

La norme NF ISO 4359 propose une méthode de calcul et un référentiel de contrôle des canaux jaugeurs « Venturi » à col long et présentant une section rectangulaire, trapézoïdale et en U. Malgré tout l'intérêt de ce document, son application au domaine de l'assainissement pose plusieurs difficultés.

Tout d'abord, de nombreux canaux jaugeurs disponibles sur le marché n'entrent pas dans le champ d'application de cette norme, notamment :

- Les canaux à col court voire sans longueur de col (le col correspond à une seule section en travers), par exemple les canaux « Khafagi »,
- Les canaux présentant une section de col qui n'est ni rectangulaire, ni trapézoïdale ni en U, par exemple les canaux à section « parabolique » ou « exponentielle »,
- Les canaux dont la largeur de col est inférieure à 100 mm.

De plus, certaines tolérances énoncées dans la norme sont très restrictives, tout particulièrement lorsqu'elles sont exprimées en pourcentage de dimension, ce qui aboutit parfois à des tolérances absolues très faibles et difficilement réalistes avec les procédés de fabrication ainsi que les conditions de pose des canaux. Il convient de préciser sur ce point que la norme dans sa version de 2023 a évolué positivement en stipulant qu'aucune tolérance ne pouvait être inférieure à 1 mm ; par exemple, la tolérance de 0.2% sur la largeur de col, et qui correspondrait à 0.2 mm pour un col de largeur 100 mm, est ramenée à 1 mm. Cette tolérance minimale de 1 mm demeure cependant très faible pour certaines grandeurs.

Enfin, ces tolérances ont été définies dans un objectif sécuritaire de garantir la relation hauteur – débit mais aucun lien n'est généralement fait entre les tolérances géométriques demandées par la norme et l'impact hydraulique correspondant. L'état de l'art sur l'impact des déformations sur la relation hauteur – débit peut pourtant permettre d'élargir certaines tolérances, notamment sur le chenal d'approche dont l'impact hydraulique est bien moindre que celui du col, tout en garantissant un degré de précision compatible avec les objectifs de mesure. La norme précise à ce sujet dans sa version de 2023 qu'il « est possible que la précision relative à certaines dimensions ou pentes soit assouplie sans effet significatif sur la précision de mesure du débit des canaux jaugeurs à profondeur critique » ; malheureusement, aucune tolérance « assouplie » n'est fournie. C'est l'objet de la présente étude et de la feuille de contrôle associée à ce rapport.

1.2. Objectifs

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

1. Définir un référentiel de contrôle des canaux jaugeurs qui permette de garantir une mesure du débit de bonne qualité tout en restant pragmatique vis-à-vis des contraintes du site et des contraintes liées au contrôle en lui-même.
2. Définir un protocole de contrôle permettant de déterminer si un canal de comptage contrôlé entre ou sort de ce référentiel.
3. Construire une feuille de calcul à destination des personnes en charge du contrôle, les assistant dans les mesures à prendre sur site et générant semi-automatiquement un rapport pour leur permettre de statuer sur la conformité d'un canal de comptage.

2. ETAT DE L'ART

2.1. Préambule

Pour atteindre ces objectifs, ce travail s'appuie sur l'état de l'art suivant :

- L'état de l'art antérieur à la norme ISO 4359,
- La norme NF ISO 4359 dans sa dernière version (2023),
- Les essais réalisés sur banc hydraulique par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) avec des déformations imprimées en 3D et illustrés sur la Figure 1 (2021),
- Le guide technique « Mesure du débit d'un écoulement à surface libre par un canal Venturi » proposant, sur base de modélisations hydrauliques 3D de canaux déformés, des tolérances pour quelques déformations typiques (première version en 2014, mise à jour en 2020),
- Le document *Minimum requirements for self-monitoring of flow: MCERTS performance standard* proposé en 2022 par l'Agence de l'environnement britannique, sachant que cette agence s'est placée dans un état d'esprit similaire à celui mis en œuvre dans cette étude, à savoir garantir des mesures de débit de bonne qualité tout en demeurant pragmatique et adapté aux problématiques rencontrées sur le terrain.

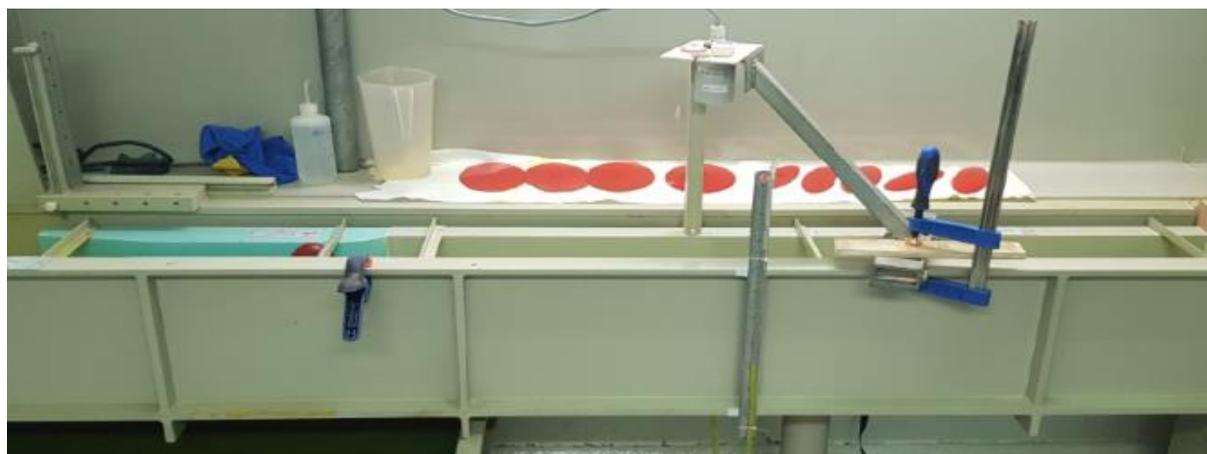


Figure 1. Test d'un canal Venturi avec diverses déformations (source : AERMC).

2.2. L'état de l'art antérieur à la norme ISO 4359

L'état de l'art sur les canaux jaugeurs, sur lequel la norme ISO 4359 s'est en partie appuyée, remonte à plusieurs dizaines d'années (Ackers et al. 1978, Bos 1989, Clemmens et al. 2001). Cet état de l'art fait état de la mesure de débit au moyen de canaux jaugeurs de type et de forme variées :

- Des canaux à cols longs aux sections variées : rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale, parabolique, circulaire, en U... (voir la Figure 2),
- Des canaux à cols courts ou sans col, parmi lesquels :
 - Les canaux Khafagi,
 - Les canaux Parshall,
 - Les canaux « *cut-throat* »,
 - Les canaux H.

L'état de l'art explique que ces différents types de canaux fonctionnent sur le même principe hydraulique. En ce sens, les canaux à col court sont parfaitement opérationnels. Leurs avantages sont

l’emprise et le coût réduits. Leur inconvénient principal réside dans l’élaboration théorique plus difficile de la relation hauteur – débit, avec notamment une forte dépendance du coefficient de débit à la charge amont ainsi qu’à la géométrie du divergent aval (du fait de la forte courbure au niveau de la section de contrôle),

SHAPE OF CONTROL SECTION	HEAD-DISCHARGE EQ. TO BE USED	HOW TO FIND THE y_c - VALUE
	$Q = C_d C_v \frac{2}{3} (\frac{2}{3} g)^{1/2} b_c h_1^{3/2}$	$y_c = \frac{2}{3} H_1$
	$Q = C_d C_v \frac{16}{25} (\frac{2}{5} g)^{1/2} \tan \frac{\theta}{2} h_1^{5/2}$	$y_c = \frac{4}{5} H_1$
	$Q = C_d [b_c y_c + z_c y_c^2] [2g(H_1 - y_c)]^{1/2}$	Use Table 3.1
	If $H_1 < 1.25 H_b$ $Q = C_d C_v \frac{16}{25} (\frac{2}{5} g)^{1/2} \tan \frac{\theta}{2} h_1^{5/2}$ If $H_1 > 1.25 H_b$ $Q = C_d C_v \frac{2}{3} (\frac{2}{3} g)^{1/2} B_c (h_1 - \frac{1}{2} H_b)^{3/2}$	$y_c = \frac{4}{5} H_1$ $y_c = \frac{2}{3} H_1 + \frac{1}{6} H_b$
	$Q = C_d C_v (\frac{3}{2} f_c g)^{1/2} h_1^2$	$y_c = \frac{3}{4} H_1$
	$Q = C_d d_c^{5/2} \sqrt{g} [f(\theta)]$ use table 7.2 to find $f(\theta)$	Use Table 7.2
	If $H_1 \leq 0.70 d_c$ $Q = C_d d_c^{3/2} \sqrt{g} [f(\theta)]$ use table 7.2 to find $f(\theta)$ If $H_1 \geq 0.70 d_c$ $Q = C_d C_v \frac{2}{3} (\frac{2}{3} g)^{1/2} d_c (h_1 - 0.1073 d_c)^{3/2}$	Use Table 7.2 $y_c = \frac{2}{3} H_1 + 0.0358 d_c$

Figure 7.2 Head-discharge relationship for long-throated flumes (from Bos 1985)

Figure 2. Variété des formes de col des canaux jaugeurs rencontrées dans la littérature (source : Bos 1989).

Certaines de ces sources mentionnent des tolérances, ainsi qu’illustré par exemple sur la Figure 3.

On bottom width of throat 0.002 m
On deviation from a plane, of plane surfaces in the throat 0.002 m
On width between vertical surfaces in throat 0.002 m
On overall level of the base of the throat 1 in 1,000
On slope of inclined surfaces in the throat 1 per cent.
On length of throat 0.005 m
On deviation from a cylindrical or conical surface in the entrance transition to the throat 0.002 m
On deviation from a plane, of plane surfaces in the entrance transition to the throat 0.002 m
On deviation from a plane, of plane surfaces in the exit transition from the throat 0.005 m
On vertical or inclined surfaces, deviation from a plane or curve 1 per cent.
On deviation from a plane, of the bed of the lined approach channel 0.002 m

Figure 3. Exemples de tolérances (source : Ackers et al. 1978).

Seules les sections de forme rectangulaire, trapézoïdale et en U ont été intégrées à la norme ISO 4359, probablement parce qu'elles étaient les plus utilisées et/ou celles pour lesquelles les données étaient les plus disponibles¹.

Le choix de restreindre la norme ISO 4359 aux canaux à col long vient probablement du fait que cette norme se donne notamment comme objectif de fournir une méthode de calcul de la relation hauteur – débit (sans procéder au moindre essai en laboratoire). Seuls les canaux à col long avaient alors fait l'objet d'une théorie suffisamment robuste pour pouvoir garantir la relation hauteur – débit.

Il est à noter que quelques études ont depuis été menées sur d'autres types de canaux, par exemple par Castro-Orgaz (2008) qui a proposé une méthode de détermination de la relation hauteur – débit des canaux Khafagi.

2.3. Norme NF ISO 4359

La norme NF ISO 4359 poursuit trois objectifs distincts :

1. Définir les conditions permettant de garantir le principe de mesure d'un canal jaugeur (conditions de l'écoulement amont, conditions de l'écoulement aval...),
2. Définir les conditions permettant d'établir la relation hauteur – débit d'un canal jaugeur selon la méthode fournie par la norme (sans devoir procéder à des essais sur banc hydraulique ou à une modélisation hydraulique 3D),
3. Définir les conditions permettant de garantir que la relation hauteur – débit est suffisamment précise (position de la sonde, contrôle du zéro de la sonde, tolérances sur les dimensions géométriques...).

Le fait que la norme ait ces trois objectifs distincts conduit à brouiller ses conditions d'application. Par exemple, le fait que la norme demande que la longueur du col soit au moins égale au double de la hauteur maximale mesurée, soit un rapport h/L de 0.5^2 , peut laisser penser que les canaux à col court ne permettent pas de mesurer correctement le débit. Ce n'est pourtant pas le cas et de tels canaux

¹ Une légende raconte que les canaux Khafagi n'ont pas été intégrés à la norme car la personne qui en était spécialiste était absente lors de la réunion qui abordait ce type de canaux.

² La version 2023 stipule qu'on pourrait accepter des rapports h/L allant jusqu'à 1.0 pour les cols rectangulaires.

permettent eux-aussi le passage par l'écoulement critique et donc une relation univoque entre la hauteur et le débit. Cette condition, ainsi que beaucoup d'autres demandées par la norme (forme du col, largeur minimale, etc.), n'a en réalité pas pour but de garantir un bon fonctionnement du canal ; elle a pour but de garantir que la méthode de calcul de la relation hauteur – débit proposée par la norme est précise.

Par ailleurs, le 2^{ème} objectif et le 3^{ème} objectif mentionnés ci-dessus pourraient paraître identiques mais ils concernent en réalité deux aspects bien différents. Les conditions relatives au 2^{ème} objectif permettent de garantir que la méthode d'élaboration de la relation hauteur – débit fournie par la norme est bien dans son domaine de validité (en se fondant par exemple sur les dimensions fournies par le fabricant du canal). Les conditions relatives au 3^{ème} objectif permettent quant à elles de valider que la relation hauteur – débit fournie, quelle que soit la façon dont elle a été établie, demeure valide pour le canal contrôlé malgré les écarts liés au processus de fabrication du canal ainsi qu'aux conditions de pose.

Dans le cadre de la présente étude, dans la mesure où le référentiel de contrôle doit pouvoir s'appliquer à tout type de canaux, il convient de ne pas prendre en considération les conditions correspondant au 2^{ème} objectif et qui sont nécessaires pour l'établissement de la relation hauteur – débit mais seulement celles correspondant aux 1^{er} et 3^{ème} objectifs et permettant de garantir un bon fonctionnement hydraulique du canal de comptage et une bonne précision de la relation hauteur – débit, quel que soit le type de canal et quelle que soit la façon dont la relation hauteur – débit a été établie.

Le tableau suivant liste ainsi l'ensemble des conditions demandées par la norme NF ISO 4359. Celles relatives au bon fonctionnement du canal (objectif 1, lignes en bleu clair) et à la précision de la relation hauteur – débit (objectif 3, lignes en vert clair) y sont mises en évidence. Les autres conditions, nécessaires à l'établissement de la relation hauteur – débit selon la méthode de la norme (objectif 2), sont laissées dans le tableau pour information.

Objectifs	Critère	Valeur limite	Référence ISO 4359
Types de canaux jaugeurs et principes de fonctionnement			
1	Écoulement critique dans le col		&5.1
2	Forme du col	Rectangulaire, trapézoïdal ou en U	&5.1
3	Distribution de la vitesse dans le chenal d'approche	Illustration de profils acceptables	&5.1
2	Col	Long	&5.2
2	Convergent	Pratiquement aucune perte de charge	&5.2
1	Col	Suffisamment restreint	&5.2
Installation			
3	Chenal d'approche	Section droite suffisamment longue	&6.1.2
3	Écoulement dans le chenal d'approche	Distribution de vitesse suffisamment uniforme	&6.1.2
1	Écoulement dans le chenal d'approche	Pas de pente qui conduirait à un écoulement torrentiel	&6.1.2
1	Écoulement dans le chenal aval	Pas d'influence aval	&6.1.2
3	Structure du canal	Canal rigide et étanche	&6.2.2.1

Objectifs	Critère	Valeur limite	Référence ISO 4359
3	Structure du canal	Surface lisse, particulièrement dans le col	&6.2.2.2
3	Tolérance minimale	La tolérance est au minimum de 1 mm pour les conditions suivantes.	&6.2.2.3
3	Largeur de la base du col	Ecart < 0.2% de la largeur, max 0.01 m	&6.2.2.3
3	Planéité du col	Ecart < 0.1% de L (longueur du col)	&6.2.2.3
3	Ecartement des parois du col	Ecart < 0.2% de la largeur, max 0.01 m	&6.2.2.3
3	Pente moyenne longitudinale de la base du col	Ecart < 0.1%	&6.2.2.3
3	Pente moyenne transversale de la base du col	Ecart < 0.1%	&6.2.2.3
3	Pente des surfaces obliques du col (???)	Ecart < 0.1%	&6.2.2.3
3	Longueur de col	Ecart < 1% de L	&6.2.2.3
3	Cylindricité ou conicité du convergent	Ecart < 0.1% de L	&6.2.2.3
3	Planéité des surfaces planes du convergent	Ecart < 0.1% de L	&6.2.2.3
3	Planéité des surfaces planes du divergent	Ecart < 0.3% de L	&6.2.2.3
3	Planéité ou courbure des autres surfaces verticales ou obliques (???)	Ecart < 1%	&6.2.2.3
3	Planéité du lit dans la partie revêtue du chenal d'approche	Ecart < 0.1% de L	&6.2.2.3
3	Distribution de la vitesse dans le chenal d'approche	raisonnablement proche des exemples	&6.2.3.1
3	Longueur droite pour les canaux artificiels (distance amont du point de mesure)	> 5B voire 10B pour les canaux neufs	&6.2.3.2
3	Longueur droite pour les canaux artificiels (distance amont du point de mesure)	Davantage possiblement nécessaire si l'entrée se fait via courbe, chenal plus étroit ou avec un angle	&6.2.3.2
3	Longueur droite pour les canaux artificiels (distance amont du point de mesure)	> 10 fois la hauteur de chute (d amont - tranquillisateurs)	&6.2.3.2
3	Longueur droite pour les canaux artificiels (distance amont du point de mesure)	> 30 fois la charge max si onde stationnaire en amont	&6.2.3.2
1	Mettre une échelle pour voir si influence aval		&6.2.4.1
Entretien			
3	Dispositif de mesure entretenu		&7.1
3	Chenal d'approche propre		&7.2
3	Canal propre		&7.3

Objectifs	Critère	Valeur limite	Référence ISO 4359
Mesurage de la charge			
3	Point de mesure suffisamment en amont du col		&8.2.1
1	Hauteur aval inférieure à la limite modulaire		&8.2.2
3	Réglage initial du zéro puis vérifications régulières		&8.4.1
3	Nécessité d'un dispositif de contrôle des mesures (plaques horizontales)		&8.4.2
3	Ne pas faire le zéro si présence d'un peu d'eau (erreur importante pour les petits canaux)		&8.4.4
Canal jaugeur à col rectangulaire			
1	3 types possibles	contraction latérale seule, contraction verticale seule, contraction latérale et verticale	&10.1.2
2	Courbure du convergent	$> 2*(B-b)$	&10.1.4
3	Section de mesure	> 3 à 4 fois la charge maximale en amont du convergent	&10.2
1	Limite modulaire	hamont $> 1.25 \times h_{\text{aval}}$ (1.33 si évasement tronqué)	&10.3.1
2	Hauteur minimale	$> \max(0.05 \text{ m} ; 0.05 \times L)$	&10.6.1
1	Rapport de sections de passage	$bh/B(h+p) < 0.7$, correspondant à $Fr < 0.5$	&10.6.2
2	Largeur du col	$> 0.10 \text{ m}$	&10.6.3
2	Ratio h/largeur de col	$h/b < 3$	&10.6.3
2	Ratio h/longueur de col	$h/L < 0.50$	&10.6.3
2	Ratio h/longueur de col	$h/L < 0.67$	&10.6.4
2	Ratio h/longueur de col	$h/L < 1.00$	&10.6.4
Canaux jaugeurs à col trapézoïdal			
2	Angle de la convergence	$< 1:3$ (transversal sur horizontal)	&11.1.5
2	Si convergence arrondie	Tangente au début du col	&11.1.5
2	Angle du divergent	$< 1:3$ (transversal sur horizontal) ; 1:6 donne une limite modulaire élevée	&11.1.6
3	Section de mesure	> 3 à 4 fois la charge maximale en amont du convergent	&11.2
1	Limite modulaire (modulaire = sans impact de la hauteur aval)	$H/H_d > 1.10$ pour 1:20, 1.20 pour 1:10, 1.25 pour 1:6 et 1.35 pour 1:3 ; avec H charge amont et H_d charge aval (ce sont les hauteurs en vrai je pense)	&11.3.2
2	Hauteur minimale	$> \max(0.05 \text{ m} ; 0.05 \times L)$	&11.6.1
1	Froude	$Fr < 0.5$	&11.6.2

Objectifs	Critère	Valeur limite	Référence ISO 4359
2	Largeur du col	> 0.10 m mais une exception peut exister pour les canaux de petite taille	&11.6.3
2	Ratio h/b	$h/b < 3$	&10.6.3
2	Ratio h/L	$h/L < 0.50$	&10.6.3
2	Ratio h/longueur de col	$h/L < 0.67$	&10.6.4
Canaux jaugeurs à col en U (à fond arrondi)			
2	Angle de la convergence	<1:3 (transversal sur horizontal)	&12.1.4
2	Angle du divergent	<1:3 (transversal sur horizontal) ; 1:6 donne une limite modulaire élevée	&12.1.5
3	Section de mesure	> 3 à 4 fois la charge maximale en amont du convergent	&12.2
1	Limite modulaire (modulaire = sans impact de la hauteur aval)	$H/H_d > 1.24$ pour 1:6, 1.35 pour 1:3 ; avec H charge amont et H_d charge aval (ce sont les hauteurs en vrai je pense)	&12.3.2
2	Hauteur minimale	$> \max(0.05 \text{ m} ; 0.05 \times L)$	&12.6.1
1	Froude	$Fr < 0.5, 0.6$ si nécessaire de charrier des sédiments	&12.6.2
2	Diamètre du col	> 0.10 m	&12.6.4
2	Ratio h/L	$h/L < 0.50$	&12.6.4
1	Contraction	Contraction nécessaire sur toute la hauteur, pas seulement en bas	&12.6.4
2	Ratio h/L	h/L possible jusqu'à 0.67	&12.6.5

Tableau 1. Liste de l'ensemble des conditions de la norme NF ISO 4359 classées selon leurs objectifs (1, 2 ou 3).

2.4. Essais expérimentaux réalisés par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

L'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) a procédé en 2021 dans son laboratoire à des essais de caractérisation de la relation hauteur – débit sur un canal HQI 415 de la société ENDRESS-HAUSER sur lequel des défauts imprimés en 3D avaient été « ajoutés ».

- Sur le chenal d'approche (en général au niveau de la section de mesure du niveau) :
 - Une bosse a été mise en place sur une paroi,
 - Une bosse a été mise en place sur le fond,
 - Une réduction de la largeur a été réalisée,
 - Des pentes et contre-pentes ont été mises en place,
- Sur le col :
 - Une bosse a été mise en place sur une paroi,
 - Une bosse a été mise en place sur le fond,

Dans chacun des cas testés, la courbe hauteur – débit du canal a été déterminée et comparée à la relation hauteur – débit calibrée pour un canal non déformé et obtenu à partir d'un débitmètre électromagnétique étalon. L'incertitude de mesure sur la hauteur a été estimée à 0.5 mm ; l'incertitude sur le débit à moins de 1%.



Figure 4. Exemple d'une bosse située sur le radier en aval du col (source : AERMC).

Les conclusions de ces différents essais sont synthétisées ci-après :

- Les bosses sur les parois du chenal d'approche ainsi que les réductions de section testées dans le chenal d'approche, malgré des tailles parfois conséquentes (bosse allant jusqu'à 15.2 mm pour une largeur de chenal d'approche de 150 mm, soit 10% de la largeur) ont un impact faible voire très faible sur la relation hauteur – débit : 1% à 2% d'écart sur le débit tout au plus pour une hauteur donnée. Ce constat est cohérent avec le fait que la relation hauteur – débit est principalement conditionnée par le col du canal, le chenal d'approche ne « servant » qu'à convertir la charge en hauteur d'eau.
- Le constat est identique pour les bosses situées sur le radier du chenal d'approche. Les écarts obtenus pour une bosse de 5.4 mm (soit environ 10% de la hauteur d'eau minimale), que la bosse soit située en amont ou en aval de la section de mesure de la hauteur d'eau, demeurent limités à 2.6% au maximum.
- La présence d'une pente ou contrepente dans le chenal d'approche peut en revanche provoquer des écarts pouvant être très importants (parfois supérieurs à 10%), notamment du fait de la forte dépendance à l'endroit par rapport auquel le zéro de la sonde de hauteur est réalisé.
- La présence d'une bosse sur une paroi du col peut de même provoquer des écarts importants sur la relation hauteur – débit. Par exemple, une bosse de 15.2 mm, soit une hauteur de bosse correspondant à 20% de la largeur du col de 75 mm, placée sur une paroi du col peut provoquer jusqu'à 6% d'écart si la bosse est située à l'aval du col, jusqu'à 7% si elle est située au milieu du col et jusqu'à 11% si elle est située en amont du col. Ce constat s'explique par le fait qu'une telle bosse contribue à contraindre la section critique qui est l'élément principal déterminant la relation hauteur – débit.
- La présence d'une bosse sur le fond du col peut enfin provoquer des écarts très importants, notamment pour les faibles hauteurs d'eau (environ 50 mm) : jusqu'à environ 20% d'écart sur le débit pour une bosse de 11 mm (soit environ 20% de la hauteur d'eau) placée au radier en amont ou au milieu du col, jusqu'à environ 15% pour cette même bosse placée au radier en aval du col. Ces écarts diminuent cependant assez rapidement à mesure que la hauteur d'eau augmente : les écarts tombent ainsi à moins de 6% dès que la hauteur dépasse 100 mm environ.

2.5. Simulations hydrauliques 3D du laboratoire ICube

Deux canaux jaugeurs, un « petit » de largeur de col 101 mm et un « grand » de largeur de col 480 mm, ont été modélisés par mécanique des fluides numérique et ont fait l'objet de plusieurs centaines de simulations (Dufresne & Vazquez 2020). Ces simulations ont varié les débits et les déformations/défauts des canaux. De façon similaire au travail expérimental réalisé par l'AERMC, les résultats obtenus pour les canaux déformés ont été comparés aux résultats correspondant aux canaux non déformés.

Les défauts suivants ont été testés :

- Pente ou contrepente de l'ensemble du canal (chenal d'approche et canal de mesure),
- Bosses de forme cylindrique sur les parois du col au milieu des deux côtés du col (en vis-à-vis),
- Creux de forme cylindrique sur les parois au milieu des deux côtés du col (en vis-à-vis),
- Bosse de forme circulaire sur le radier du col (au milieu de celui-ci),
- Creux de forme circulaire sur le radier du col (au milieu de celui-ci).

L'incertitude des résultats obtenus par mécanique des fluides numérique a été évaluée à 1%.

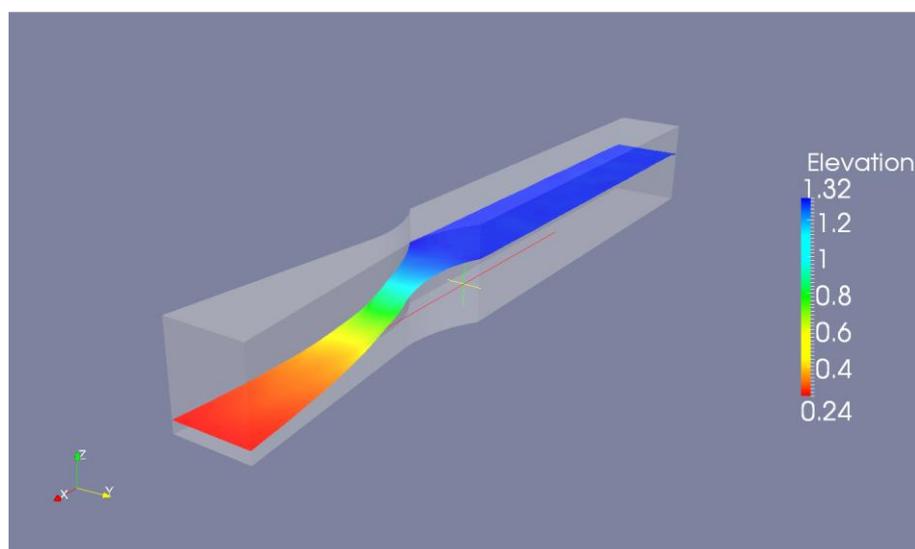


Figure 5. Exemple de simulation d'un écoulement par mécanique des fluides numérique.

Les conclusions de cette démarche sont résumées ci-après :

- Des bosses sur les parois du col impactent la relation hauteur – débit dans une même proportion que la diminution de largeur : ainsi, une réduction de la largeur du col de 2% de largeur conduit à un écart de 2% sur le débit ; une réduction de 5% de la largeur conduit à 4% sur le débit. Ce constat est cohérent avec le fait que le débit transitant dans un canal jaugeur est proportionnel à la largeur de son col.
- Des creux sur les parois du col impactent moins fortement la relation hauteur – débit : un élargissement local dû à des creux de 4% de la largeur du col ne conduit ainsi qu'à un écart de 2% sur le débit ; un élargissement de 10% conduit à 5% sur le débit. Ce constat peut s'expliquer par le fait que la section de contrôle correspond à l'endroit le plus contracté et donc pas à l'endroit où se trouvent les creux, qui constituent d'une certaine façon une zone morte pour l'écoulement.
- Une bosse sur le fond du col impacte assez fortement la relation hauteur – débit. Une bosse dont la hauteur représente 1% de la largeur du col entraîne ainsi jusqu'à 5% d'écart sur la

relation hauteur – débit. C'est le même constat que pour les essais menés par l'AERMC, notamment pour les faibles hauteurs d'eau.

- Un creux sur le fond du col impacte quant à lui la relation hauteur – débit dans la même proportion que le rapport de la profondeur du creux rapportée à la largeur du col : un creux dont la profondeur vaut 2% de la largeur du col conduit ainsi à un écart de 2%, un creux de 5% conduit quant à lui à 5% d'écart.
- Enfin, la présence d'une pente ou contrepente impactent également assez fortement la relation hauteur – débit. L'étude a notamment défini une valeur de pente maximale (une valeur de pente descendante et une valeur de pente montante, c'est-à-dire une contrepente) au-delà de laquelle faire le zéro par rapport au col du canal n'est plus suffisant pour garantir la relation hauteur – débit. Pour une pente descendante, la valeur maximale est égale est 0.4% pour un écart maximum de 2%, 0.8% pour un écart maximum de 5%. Pour une pente montante (contrepenne), la valeur maximale est égale est 1.2% (c'est-à-dire une contrepente de -1.2%) pour un écart maximum de 2%, 2.0% (c'est-à-dire une contrepente de -2.0%) pour un écart maximum de 5%.

2.6. Approche MCERTS

L'Agence de l'environnement du Royaume-Uni considère dans le document *Minimum requirements for self-monitoring of flow: MCERTS³ performance standard* que les tolérances prescrites dans les normes internationales sont pour certaines irréalisables sur le terrain. Elle propose d'augmenter certaines de ces tolérances, tout en précisant que :

- Les tolérances proposées se fondent sur l'état de l'art actuel, pas entièrement compris, et qu'elles sont susceptibles d'évoluer dans le futur,
- La personne qui procède au contrôle doit faire preuve d'esprit critique et s'adapter à la situation du site qu'elle contrôle.

Les critères que l'Agence de l'environnement propose de faire évoluer sont les suivants ; tous les autres demeurant identiques (c'est-à-dire sans concession) aux prescriptions de la norme ISO 4359 [les valeurs entre crochets indiquent les valeurs de l'ISO 4359] :

- Largeur de col minimale : 50 mm (avec une incertitude supplémentaire de 1%) [100 mm]
- Tolérance sur la largeur du col : 1.5% pour les largeurs inférieures à 300 mm, 5 mm au-delà [0.2%, max 10 mm]
- Tolérance sur la pente transversale du col : +/-1% [+/-0.1%]
- Tolérance sur la pente longitudinale du col : +/-1% [+/-0.1%]
- Tolérance sur la pente du chenal d'approche : +/-1% [+/-0.1% de L]
- Tolérance sur la largeur du chenal d'approche : +/-5% [pas d'information à ce sujet dans l'ISO 4359]
- Centralité du canal d'approche/col : +/-5% [parfaitement centré dans l'ISO 4359]
- Décalage des deux côtés du convergent : +/-1% de L [+/-0.1% de L]
- Courbure du convergent : +/-1% de L [+/-0.1% de L]

Il convient de préciser que le MCERTS ne semble pas permettre l'utilisation de canaux autres que les canaux à cols longs. Les critères concernent donc pour certains d'entre eux l'objectif 2 de l'ISO 4359, à

³ MCERTS signifie *Monitoting CERTification Scheme*.

savoir permettre de garantir la méthode de calcul de la relation hauteur – débit, ce qui ne fait pas partie des objectifs de la présente étude.

3. PROPOSITION D'UN PROTOCOLE DE MESURE ET D'UN REFERENTIEL DE CONTROLE

3.1. Appareil de mesure

Le protocole de mesure doit pouvoir être réalisé par un contrôleur sur site au moyen du matériel suivant :

- Outils de mesure des distances : distancemètre laser, mètre déroulant, réglet, pied à coulisses pour mesure interne (pour les canaux étroits)
- Plan laser pour disposer d'un plan horizontal (choisir un modèle pour que la précision demeure de moins de 1 mm dans la zone prévue pour les mesures)
- Mire de géomètre avec graduation au millimètre
- Niveaux à bulle de longueur variées (par exemple 30 cm et 100 cm)

De façon générale, la précision des appareils de mesure doit être compatible avec le type de mesures réalisées. Si une mesure est peu précise comparativement à l'utilisation qui est faite de la mesure, le contrôleur doit l'indiquer en commentaire.

3.2. Etat d'esprit des tolérances proposées

La feuille de contrôle proposent trois degrés de tolérance :

- La norme NF ISO4359 : celle-ci est très sécuritaire sur la plupart des critères
- Une tolérance « raisonnable » : celle-ci correspond à un écart de l'ordre de 1% à 2% maximum sur le débit
- Une tolérance « extrême » : celle-ci correspond à un écart de l'ordre de 3% à 5% maximum sur le débit

Compte tenu des défauts très divers pouvant être rencontrés dans les canaux ainsi que du manque de connaissances sur l'impact des déformations sur l'évaluation du débit (voir l'état de l'art plus haut), les valeurs de 1%-2% et 3%-5% annoncées plus haut ne sont que des ordres de grandeur approximatifs. On peut malgré tout garantir affirmer que, sauf exception mentionnée ci-dessous (notamment sur la non-horizontalité du radier), elles constituent une démarche sécuritaire.

Le contrôleur qui effectue un audit du canal conserve toute son expertise pour s'affranchir des tolérances proposées ici selon les cas de figures auxquels il est confronté.

3.3. Type de canaux concernés

Compte tenu du type de canaux rencontrés le plus fréquemment sur le terrain, le protocole et le référentiel est à ce jour uniquement adapté aux canaux rectangulaires. Les canaux non rectangulaires présentent des difficultés pour la mesure de leurs dimensions, ils sont à ce stade exclus.

3.4. Protocole et référentiel proposés

3.4.1. Identification du canal

La première étape consiste à identifier le fabricant et le modèle du canal. Si le modèle est dans la base de données, le contrôleur le choisit dans la feuille de calcul et il dispose ainsi des dimensions et des caractéristiques du canal (avec éventuellement quelques lacunes).

En cas d'erreur ou de lacune dans la base de données, le contrôleur peut renseigner les caractéristiques du canal manuellement.

3.4.2. Etat général

La vérification de l'état général du canal peut être réalisée canal en eau ou à sec.

Le contrôleur répond aux questions suivantes et renseigne la feuille de contrôle en conséquence :

- Canal rigide sur toute sa longueur ? Oui ou non (inspection visuelle et au toucher)
- Canal étanche sur toute sa longueur ? Oui ou non (inspection visuelle et au toucher)
- Surface lisse dans le col du canal ? (pas d'algues, pas de dépôts...) Oui ou non (inspection visuelle et au toucher)
- Bon entretien du canal et du chenal d'approche ? Oui ou non (inspection visuelle)
- Bon entretien du dispositif de mesure ? Oui ou non (inspection visuelle)

3.4.3. Fonctionnement hydraulique du canal

La vérification du fonctionnement hydraulique du canal doit être réalisée lorsque le canal est en eau. Dans l'idéal, cette vérification est menée pour un faible débit, un débit intermédiaire et un débit important. Dans le cas où le débit n'est pas facilement réglable, la vérification est réalisée pour le débit rencontré au moment de la visite.

Le contrôleur répond aux questions suivantes, procède aux mesures suivantes et renseigne la feuille de contrôle avec les éléments correspondants :

- Ecoulement fluvial tranquilisé en amont ?
 - Oui ou non (inspection visuelle)
 - Mesure des fluctuations de niveau d'eau : une mesure précise des fluctuations de niveau nécessite par exemple l'utilisation d'un régllet et d'une caméra pour en analyser les images ; nous proposons ici une mesure simplifiée consistant à positionnant un régllet sur une paroi du chenal d'approche au niveau de la section de mesure et à estimer à l'œil la plage de variation du niveau (+/- dh). Les tolérances fournies ci-dessous sont calculées en considérant que la mesure de niveau est effectuée dans la pire situation, c'est-à-dire au sommet ou au creux de la vague ; elles considèrent en outre que l'incertitude sur le débit est égale à 1.5 fois l'incertitude sur la hauteur (le débit étant proportionnel à la hauteur à la puissance 1.5 dans un canal au col rectangulaire).
- Tolérance sur les fluctuations
 - Raisonnable : $2\%/1.5xh = 0.013xh$
 - Extrême : $5\%/1.5xh = 0.033xh$

Exemple : la hauteur dans le chenal d'approche est égale à 200 mm, les tolérances sont donc à +/-2.6 mm (raisonnable) et +/-6.6 mm (extrême).

Concernant le régime d'écoulement, des liens vidéos sont disponibles sur la feuille de contrôle pour donner des repères au contrôleur. Un moyen simple est de créer une perturbation dans le canal, par exemple avec le pied, et de s'assurer que les perturbations provoquées remontent vers l'amont.

Compte tenu de la difficulté à mesurer précisément la vitesse, aucun calcul du nombre de Froude n'est proposé.

Compte tenu par ailleurs du faible impact de la distribution de vitesse sur la relation hauteur – débit (voir le Tableau 2 avec les modifications du débit pour différentes valeurs du coefficient alpha de distribution de la vitesse), aucune vérification de celle-ci n'est proposée.

	alpha			alpha		
	1.05	1.20	1.50	1.05	1.20	1.50
h (mm)	Q (m3/h)	Q (m3/h)	Q (m3/h)	Ecart	Ecart	Ecart
50	6.81	6.88	7.02	référence	1.0%	3.0%
200	56.51	57.08	58.27	référence	1.0%	3.1%

Tableau 2. Impact du coefficient alpha de distribution de la vitesse dans le chenal d'approche sur le débit (selon la relation hauteur – débit de l'ISO 4359 pour un canal ayant un col de largeur 100 mm et une longueur de 300 mm, un chenal d'approche de largeur 200 mm et une rugosité de 0.06 mm).

- Influence aval ? Oui ou non (inspection visuelle)

En cas de doute, par exemple d'absence de chute et/ou du ressaut hydraulique présent à proximité du col, le calcul du rapport h_{amont} sur h_{aval} permet de déterminer si la limite modulaire est dépassée, auquel cas le col est noyé par l'aval.

- Mesure dans le chenal d'approche au niveau de la sonde de mesure, pour chacun des débits testés, de la hauteur d'eau
- Mesure dans la section aval du divergent, pour chacun des débits testés, de la hauteur d'eau

L'état de l'art, et notamment la norme ISO 4359, propose différentes valeurs de limite modulaire selon les caractéristiques des canaux. Nous proposons d'utiliser la valeur sécuritaire de 1.35 (soit la valeur la plus sécuritaire parmi toutes les valeurs proposées par la norme ISO 4359). Dans le cas où le fabricant fournirait sa propre valeur de limite modulaire, le contrôleur pourra la recalculer « à la main ».

Le contrôleur regarde également s'il existe des éléments susceptibles de provoquer une influence aval dans des conditions autres que celles du jour de la visite (niveau de marée haute, fossé non entretenu, conduite de capacité hydraulique limitée).

Si un doute persiste, il recommande l'installation d'une sonde de niveau en aval du canal.

3.4.4. Dimensions du canal

Si certaines dimensions peuvent être mesurées dans un canal en eau, il est recommandé, pour que les conditions de mesure soient optimales, de procéder aux mesures des dimensions du canal dans un canal sans eau.

3.4.4.1. Largeur du col

Dans le cas d'un col rectangulaire :

- Mesure de la largeur du col en différentes altitudes et différentes positions ; dans la mesure où le col est l'organe clé pour la mesure du débit, une dizaine de positions serait un minimum,

par exemple 3 altitudes et 5 positions longitudinales (à ajuster selon la taille du canal, les cols courts ne permettront pas autant de mesure)

Remarque : le contrôleur pourra avant de procéder à ces mesures positionner une règle de maçon (ou un niveau) en différentes parties du col afin d'apprécier les irrégularités et donc les endroits potentiellement problématiques où densifier les mesures.

Dans le cas d'un col non rectangulaire (par exemple les sections trapézoïdale ou parabolique), la mesure de la largeur ne pourra pas être réalisée avec précision. Pour ces cols, il est recommandé de prendre contact avec les fabricants pour obtenir la forme exacte du col afin de faire confectionner pour chaque modèle de canal une cale de dimension inférieure à la section (par exemple 10 mm de moins en largeur sur toute la hauteur). En positionnant la cale dans le col comme indiqué sur la figure suivante, le contrôleur pourra évaluer si le col du canal qu'il est en train de vérifier comporte des écarts par rapport à la forme annoncée par le fabricant :

- Le contrôleur positionne la tige au point le plus bas du col, au milieu dans le cas d'un col à fond plat (trapèze). Il vérifie en regardant l'espacement de part et d'autre de la cale que la pièce est bien positionnée au milieu du col.
- Le contrôleur mesure, pour les différentes altitudes graduées sur la cale, au pied à coulisse ou au réglet, l'écart entre chaque paroi du col et la cale.
- Il additionne l'écart mesuré de chaque côté pour disposer de l'espacement vide à chaque altitude.
- Il additionne les 10 mm (correspondant à la réduction de taille de la cale par rapport au col) pour connaître la largeur à l'altitude considérée.
- Il procède ainsi pour au moins 3 altitudes et 5 positions sur la longueur du col (de façon similaire à un col rectangulaire).

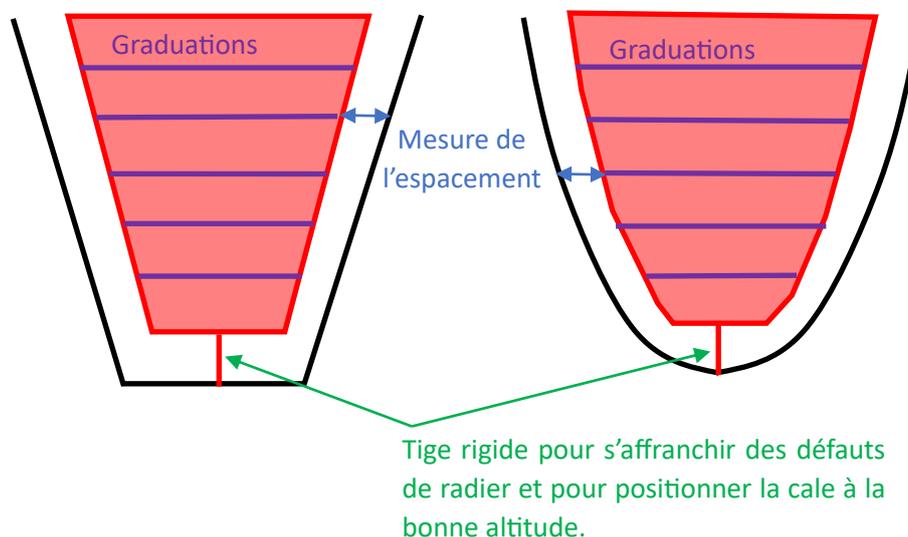


Figure 6. Exemples de cales pour vérifier la largeur du cols de forme non rectangulaire.

- Calcul par la feuille de contrôle de l'écart par rapport à la largeur du canal à l'altitude considérée (sous réserve de la disponibilité de cette information dans les caractéristiques du fabricant)
- Tolérances (en mm) :
 - ISO 4359 : soit 0.2% de la largeur, avec un minimum de 1 mm et un maximum de 10 mm, soit $\text{MAX}[\text{MIN}(0.2\% \cdot b, 10), 1]$

- Raisonnable : $\text{MAX}[\text{MIN}(2\%*b, 10), 1]$
- Extrême : $\text{MAX}[\text{MIN}(4\%*b, 20), 2]$

La tolérance raisonnable s'appuie sur les essais menés par l'AERMC et les simulations 3D réalisées par ICube. Les premiers ont en effet montré qu'une bosse ponctuelle de taille rapportée à la largeur du col T/b entraînait une erreur maximale sur le débit de l'ordre de $0.5 \times T/b$. Les seconds, qu'une bosse sur toute la hauteur de ratio T/b entraînait une erreur maximale sur le débit de l'ordre de T/b .

La tolérance raisonnable n'est pas inférieure à 1 mm car une telle tolérance serait très difficile à mesurer. Elle n'est pas plus supérieure à 10 mm car on considère cette valeur comme raisonnablement accessible, y compris pour des canaux de très grande taille ; cela revient à tolérer un écart relatif plus faible sur les grands canaux.

3.4.5. Planéité du col

Nous considérons que la planéité des parois du col est déjà vérifiée avec le critère précédent.

3.4.6. Pente longitudinale et transversale du col

Il convient ici de distinguer les différents problèmes possibles au niveau du radier du canal :

- Un canal peut être posé avec une pente sans être déformé en lui-même,
- Un canal peut présenter des déformations au niveau de son radier, mais être globalement posé à plat,
- Un canal peut présenter les deux problèmes.

Il est proposé de vérifier les deux problématiques en même temps en mesurant les différences d'altitude de différents points au niveau du col.

- Mesure, au laser plan et avec une pige précise au millimètre près, de l'altitude de plusieurs points au fond du col (par exemple 3 positions latérales et 5 positions longitudinales).

Si on se focalise sur une hauteur mesurée de 50 mm (le minimum de la norme), les tolérances seront très faibles car l'impact d'une pente ou d'une bosse sur le col peut avoir un impact très important sur l'évaluation du débit. Les essais menés par l'AERMC ont ainsi montré que l'écart sur le débit dQ/Q était approximativement lié au T/h de la taille T de la bosse sur la hauteur d'eau h de la façon suivante :

$$\frac{T}{h} \leq \frac{\Delta Q}{Q} \leq 1.5 \times \frac{T}{h}$$

Le terme de droite correspond grosso modo à un décalage de radier : si la section critique a lieu au niveau de la bosse, une bosse de taille T décale le zéro de la valeur de T ; l'écart relatif sur la hauteur vraie est donc égale à T/h . Le débit étant proportionnel à la hauteur à la puissance 1.5, l'écart relatif sur le débit est égal à environ $1.5 \times \frac{T}{h}$.

Le terme de gauche correspond plutôt aux essais de l'AERMC pour lesquelles la bosse n'occupe pas toute la largeur du col (et ne correspond en outre peut-être pas à la position de la section critique).

T (mm)	h (mm)	T/h	dQ/Q
11	50	22%	21%
5.1	50	10%	10%
2.3	50	5%	7%
1.2	50	2%	4%

Tableau 3. Résultats des essais en fonction de la taille T de la bosse pour une hauteur d'eau d'environ 50 mm.

T (mm)	h (mm)	T/h	dQ/Q
11	100	11%	6%
5.1	100	5%	4%
2.3	100	2%	2%
1.2	100	1%	2%

Tableau 4. Résultats des essais en fonction de la taille T de la bosse pour une hauteur d'eau d'environ 100 mm.

Pour une hauteur d'eau de 100 mm, il faudrait des tolérances respectives de 1 mm et 3 mm pour des écarts maximaux de l'ordre de 1% à 2% sur le débit (tolérance raisonnable) et 3% à 5% (tolérance extrême).

Pour une hauteur de 50 mm, ces tolérances pourtant déjà très faibles aboutiraient à des écarts maximaux de l'ordre respectivement à 2% à 3% (raisonnable) et 6% à 9% (extrême).

Après concertation avec l'AERMC, et afin d'éviter de déclasser la plupart des canaux, il a été acté la démarche suivante :

- Le contrôleur renseigne la hauteur minimale mesurée sur le canal (par défaut 50 mm) sur base des chroniques de débit ou de l'expérience de l'exploitant. Les tolérances raisonnable et extrême sont calculées sur base de cette hauteur minimale. Si les tolérances ne sont pas dépassées pour la hauteur minimale, la vérification s'arrête ici ; le canal est conforme sur ce point.
- Si les tolérances sont dépassées, une seconde vérification est réalisée. Son objectif est d'éviter de déclasser des canaux qui fonctionnent parfois à de faibles hauteurs d'eau alors que la contribution de ces faibles hauteurs au volume journalier est faible. Des tests menés sur des données de canaux ont montré que l'écart maximal sur le volume journalier était limité à 4% à 5% si on définissait la tolérance extrême sur base de la hauteur d'eau correspondant au débit moyen, le débit moyen étant le volume journalier divisé par la durée journalière pendant laquelle le canal est en eau.

Remarque : si le canal fonctionne en continu, cette durée est de 24 heures ; s'il fonctionne par bâchées, il faut estimer le temps pendant lequel il est en eau.

Compte tenu de l'analyse des données rapportée ci-dessous, les tolérances peuvent s'exprimer comme suit en fonction de la hauteur choisie, que ce soit la hauteur minimale pour le 1^{er} test ou la hauteur du débit moyen pour le 2nd test :

- Tolérance raisonnable : $2\%/1.5xh$ soit $0.013xh$
- Tolérance extrême : $5\%/1.5xh$ soit $0.033xh$

Ces tolérances sont limitées au maximum à 10 mm (raisonnable) et à 20 mm (extrême), considérant qu'au-delà le col du canal était jugé trop déformé (cela revient à exiger une plus grande précision sur les grands canaux).

3.4.7. Longueur du col

Des tests menés avec la feuille de calcul fournie avec la norme ISO 4359 permettent d'affirmer que l'impact de la longueur de col sur la relation hauteur – débit est très faible. Ainsi, pour des canaux en résine (rugosité 0.06 mm), une variation de 10% sur la longueur produit au maximum une variation de l'ordre de 1% sur le débit si le canal est grand (test mené avec un col de longueur 900 mm), moins de 1% si le canal est petit (test mené avec un col de longueur 300 mm). L'écart est un peu plus important si la rugosité est plus importante : jusqu'à 2% pour le grand canal pour une rugosité de 1.5 mm correspondant à un canal en béton convoyant des eaux usées. Des calculs menés avec des variations de longueur de 50% ont quant à eux conduit à des écarts de seulement quelques pourcents sur le débit.

Dans la mesure où la longueur de col impacte le développement de la couche limite dans le canal (autrement dit, la perte de charge générée), il est raisonnable d'affirmer que les canaux à col court, comme les canaux Khafagi, sont encore moins sensibles à la longueur du col. Le moindre impact du col pour les canaux à col court et la difficulté à mesurer précisément les longueurs de col court conduit à limiter les tolérances à 10 mm pour la tolérance raisonnable et à 40 mm pour la tolérance extrême.

Au vu de ces éléments, on pourrait proposer une tolérance raisonnable à environ 5% de la longueur et une tolérance extrême à 20%. Ces valeurs étant très importantes, il est proposé de ne pas prendre en considération la longueur de col parmi les critères de contrôle d'un canal.

La longueur de col n'est donc pas un critère pouvant conduire à une non-conformité.

3.4.8. Convergent amont

Les canaux à col long, dont la relation hauteur – débit est indépendante du convergent amont, ne sont pas concernés. Concernant les cols courts, les travaux réalisés par Khafagi (1942) permettent de donner quelques ordres de grandeur sur l'impact du rayon de courbure sur la relation hauteur – débit d'un. Celui-ci a ainsi en effet investigué l'impact du rayon de courbure sur la relation hauteur – débit de canaux de ratio b/B variant entre 0.29 et 0.50. Il ressort de ses expériences que le rayon de courbure du convergent est responsable de deux effets opposés. Tout d'abord, plus il est petit et plus les lignes de courant sont bouleversées, ce qui contribue à une perte de charge plus importante. D'un autre côté, un petit rayon de courbure conduit à une surface de contact moindre avec le fluide et donc moins de perte de charge par frottement. Au final, le rayon de courbure peut selon les cas contribuer à augmenter ou à diminuer la hauteur amont pour un débit donné. Par exemple, pour le canal de ratio b/B égal à 0.40 que Khafagi a testé, un débit de 14 L/s conduit à une charge de 16.89 cm pour un rayon de courbure de 40 cm et 16.42 cm pour un rayon de 20 cm ; l'écart est de 2.8% sur la charge soit environ $1.5 \times 2.8\% = 4.3\%$ sur le débit. Au vu des différents résultats de Khafagi, on peut estimer (en majorant) un impact d'environ 5% pour un rayon variant du simple au double.

Si on utilise les développements théoriques de Castro-Organ (2008), le rayon intervient dans le paramètre U qui joue sur quelques pourcents de la relation hauteur – débit. Des tests de sensibilité menés avec la relation de Castro-Organ aboutissent à un impact de l'ordre de 1% pour une variation du rayon de courbure de 50%.

Au vu de ces éléments, on pourrait proposer une tolérance de l'ordre de quelques dizaines de pourcents sur le rayon de courbure. Compte tenu du fait que cette valeur est très grande, ainsi que du

fait qu'il est difficile de mesurer un rayon de courbure, il est recommandé de ne pas prendre en considération le rayon de courbure dans les critères de contrôle.

Aucun critère de conformité ne s'appuie donc sur le rayon de courbure.

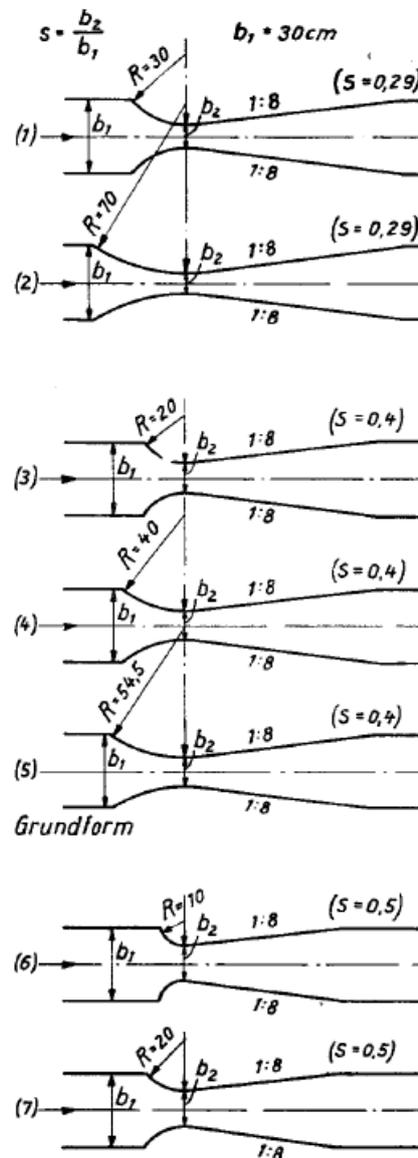


Abb. 33 a. Die gewählten Einlaufformen

Figure 7. Canaux testés par Khafagi (1942) pour l'impact du rayon de courbure.

3.4.9. Élargissement du divergent aval

De façon similaire au convergent amont, le divergent aval est sans impact sur la relation hauteur – débit pour les canaux à col long mais il impacte les canaux à cols courts.

Khafagi (1942) a caractérisé les relations hauteur – débit de canaux à col court pour lesquels l'élargissement aval était varié. Il a testé des divergents linéaires et arrondis (ce qui revient à un ratio plus petit au début du divergent et qui augmente ensuite), avec des élargissement allant de 1:4 à 1:20. Les écarts sur la hauteur pour un débit donné sont de quelques pourcents. L'écart le plus important, 7.5%, a été obtenu pour un divergent aval passant de 1:6 à 1:8. En supposant une variation linéaire

Ce critère est lié à l'agitation et/ou la non-uniformité de l'écoulement au niveau de la zone de mesure. On peut cependant tout à fait avoir un canal qui respecte le critère de 10B et dans lequel l'écoulement est agité, tout comme on peut avoir un canal qui présente un écoulement tranquilisé alors que la longueur droite n'est que de 2B.

Nous considérons donc que la longueur droite amont est un élément qui permet de disposer d'un écoulement propice à une mesure de bonne qualité mais que cela ne garantit en rien un écoulement propice à une mesure de bonne qualité.

Le critère 10B est donc retiré du référentiel du contrôle.

3.4.12. Largeur du chenal d'approche

Des tests menés avec le fichier de calcul fourni avec l'ISO 4359 aboutissent pour un petit canal ($b = 100$ mm, $B = 200$ mm et $L = 300$ mm) et un grand canal ($b = 400$ mm, $B = 800$ mm, $L = 900$ mm) aux ordres de grandeur suivants. Une largeur réduite ou augmentée de 10% sur la totalité de la largeur du chenal d'approche conduit à des écarts sur le débit de l'ordre de 1% à 2%. Une largeur réduite ou augmentée de 20%, à des écarts de l'ordre de 3% à 5% sur le débit. Les essais réalisés par l'AERMC ont quant à eux mis en évidence un écart de l'ordre de 1% à 2% avec une bosse représentant 10% de la largeur, soit les mêmes ordres de grandeur.

Ces ordres de grandeur pourraient conduire à choisir une tolérance très importante voire à complètement retirer ce critère de l'analyse. Les discussions avec l'Agence de l'Eau lors de l'élaboration de ce référentiel conduisent néanmoins à conserver ce critère et à l'affubler d'une tolérance permettant d'éviter des chenaux d'approche irréguliers (l'objectif est que le travail de maçonnerie soit soigné).

- Mesure de la largeur du chenal d'approche sur toute la longueur du chenal d'approche et à différentes altitudes de la zone de mesure et le convergent (en considérant les endroits ayant l'air déformés) : un total de 10 mesures semble largement suffisant, par exemple sur 2 altitudes (près du fond et près du haut du chenal) et pour 5 positions le long du canal (avec une mesure au niveau de la mesure de hauteur) ; le contrôleur pourra sonder la planéité des parois avec une règle de maçon pour identifier les zones les plus déformées et choisir ainsi les points de mesure.
- Tolérances :
 - Raisonnable : 10% de la largeur du chenal d'approche, maximum 25 mm
 - Extrême : 20% de la largeur du chenal d'approche, maximum 50 mm

Remarque 1 : la norme ISO 4359 ne fournit pas de tolérance (la valeur 0.2% fois la largeur parfois mentionnée ne concerne en réalité que la largeur du col). Le MCERTS propose quant à lui une tolérance de 5%.

Remarque 2 : les tolérances maximales (25 et 50 mm) sont plus importantes que les tolérances maximales définies pour les autres critères (par exemple 10 et 20 mm pour la largeur de col) car on estime qu'il est plus difficile de garantir cette précision sur un canal de longue dimension plutôt que sur une zone restreinte (au-delà du fait que l'impact de la largeur du chenal sur le calcul du débit d'approche est bien moindre).

3.4.13. Planéité du lit dans le chenal d'approche

L'impact de la planéité dans le chenal d'approche a fait l'objet de multiples discussions. Plusieurs critères ont été proposés, testés, modifiés...

Trois problématiques sont distinguées ici :

- Problématique du zéro de la sonde : si le radier sous la sonde est situé plus haut que le col du canal, alors il est physiquement impossible de procéder à un zéro précis de la sonde ; le canal est alors déclaré non conforme.
- Problématique d'un écart sur la hauteur de pelle : si la hauteur de pelle mesurée (ou son absence) est significativement différente de la valeur constructeur, alors la relation hauteur – débit est impactée ; le canal est non conforme.
- Problématique des bosses et des creux dans le chenal d'approche : si le chenal d'approche présente des creux ou des bosses très importantes, le canal doit être déclaré non conforme car cela traduit un problème de génie civil, et ce même si l'expérience montre que l'impact sur la relation h-Q est faible.

3.4.13.1. Problématique du zéro de la sonde

Le zéro de la sonde doit être réalisé par rapport à la section de contrôle hydraulique du canal dans le col. Si le radier sous la sonde est plus haut que le radier du col, cela est impossible physiquement (il faudrait « forcer » le zéro dans le paramétrage de la sonde de niveau). Un radier sous la sonde plus haut que le radier dans le col n'est donc pas toléré. La tolérance sur ce point est identique à celle présentée précédemment pour le radier du col, soit :

- Tolérance raisonnable : $2\%/1.5xh$ soit $0.013xh$
- Tolérance extrême : $5\%/1.5xh$ soit $0.033xh$

Ces tolérances sont calculées avec la « hauteur moyenne » si celle-ci est renseignée par le contrôleur, sinon avec la hauteur minimale (renseignée par défaut à 50 mm).

Remarque : sauf à présenter une pente très importante, un canal pourvue d'une pelle a très peu de risque d'être non conforme vis-à-vis de ce critère.

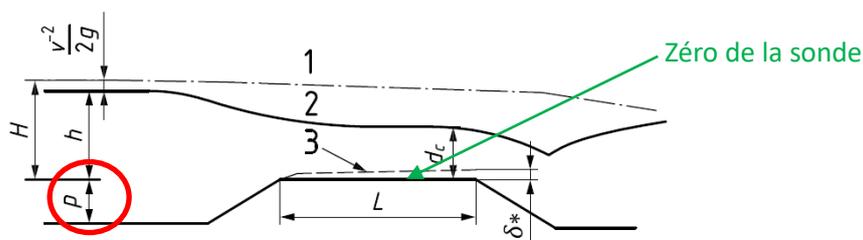


Figure 9. Hauteur de pelle du canal (source : ISO 4359).

3.4.13.2. Problématique d'un écart sur la hauteur de pelle (canal avec ou sans pelle)

La Figure 10 fournit les résultats des tests menés dans le cas de la présente étude en utilisant le fichier de calcul de la norme ISO 4359 et en modifiant la hauteur de pelle (de façon positive et négative). Les écarts mentionnés ci-dessous correspondent aux écarts entre le débit calculé avec la hauteur de pelle modifiée (canal déformé ou mal posé) et le débit calculé avec la hauteur de pelle non modifiée (constructeur).

"Petit" canal de largeur 100 mm			
b (mm)	100		
B (mm)	200		
L (mm)	300		
k (mm)	0.06		

Chenal non déformé				Chenal déformé : p = 50 mm				Chenal déformé : p = 20 mm				Chenal déformé : p = 10 mm			
h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart
50	0.001892	6.8		50	0.001812	6.5	-4.3%	50	0.001837	6.6	-2.9%	50	0.001857	6.7	-1.9%
100	0.005474	19.7		100	0.005289	19.0	-3.4%	100	0.005369	19.3	-1.9%	100	0.005413	19.5	-1.1%
200	0.015698	56.5		200	0.015333	55.2	-2.3%	200	0.015518	55.9	-1.2%	200	0.015601	56.2	-0.6%

On a aussi fait avec p<0
L'erreur n'est pas symétrique.

Chenal déformé : p = -50 mm				Chenal déformé : p = -20 mm				Chenal déformé : p = -10 mm			
h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart
50	0.0045	16.2	137.8%	50	0.00219	7.9	15.7%	50	0.001969	7.1	4.0%
100	0.007761	27.9	41.8%	100	0.005696	20.5	4.1%	100	0.00556	20.0	1.6%
200	0.016639	59.9	6.0%	200	0.015958	57.4	1.7%	200	0.015816	56.9	0.7%

"Grand" canal de largeur 480 mm			
b (mm)	480		
B (mm)	800		
L (mm)	900		
k (mm)	0.06		

Chenal non déformé				Chenal déformé : p = 50 mm				Chenal déformé : p = 20 mm				Chenal déformé : p = 10 mm			
h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart
50	0.009125	32.8		50	0.008542	30.8	-6.4%	50	0.008719	31.4	-4.4%	50	0.008854	31.9	-3.0%
100	0.026993	97.2		100	0.0256	92.2	-5.2%	100	0.026184	94.3	-3.0%	100	0.026517	95.5	-1.8%
200	0.078068	281.0		200	0.075206	270.7	-3.7%	200	0.076632	275.9	-1.8%	200	0.077284	278.2	-1.0%
500	0.312477	1124.9		500	0.306507	1103.4	-1.9%	500	0.309822	1115.4	-0.8%	500	0.311099	1120.0	-0.4%

Chenal déformé : p = -50 mm				Chenal déformé : p = -20 mm				Chenal déformé : p = -10 mm			
h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart	h (mm)	Q (m3/s)	Q (m3/h)	Ecart
50	0.008468	30.5	-7.2%	50	0.0117	42.1	28.2%	50	0.009733	35.0	6.7%
100	0.032009	115.2	18.6%	100	0.028936	104.2	7.2%	100	0.027732	99.8	2.7%
200	0.086685	312.1	11.0%	200	0.080212	288.8	2.7%	200	0.079024	284.5	1.2%
500	0.321408	1157.1	2.9%	500	0.315591	1136.1	1.0%	500	0.31397	1130.3	0.5%

Figure 10. Tests réalisés sur l'impact d'un décalage de hauteur de pelle.

La Figure 11 agglomère ces tests. Sur ce graphique, l'axe des ordonnées correspond à l'erreur sur le débit ; l'axe des abscisses, au rapport de la taille T du décalage sur la hauteur d'eau.

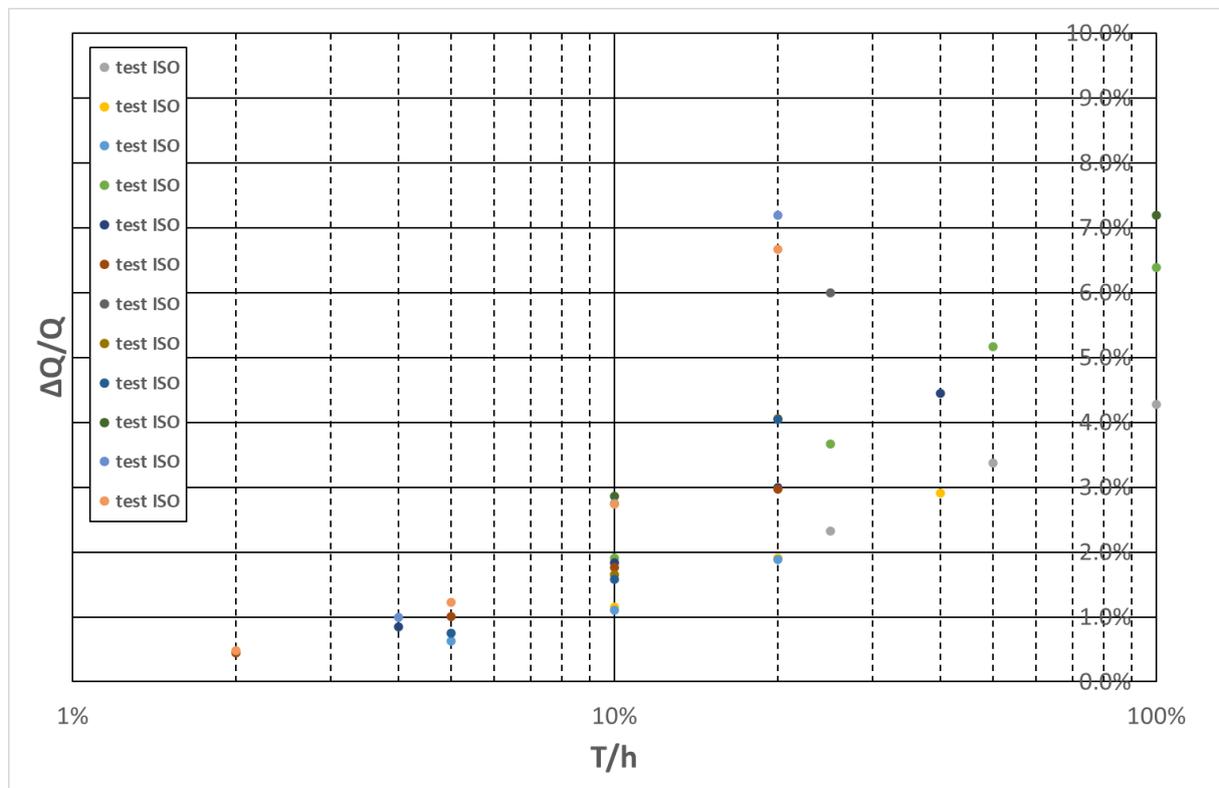


Figure 11. Erreur sur le débit en fonction de la taille T du décalage du radier du chenal d'approche.

Au vu des résultats obtenus avec un décalage de radier, les tolérances suivantes sont proposées :

- Raisonnable : 3% de la « hauteur moyenne » (à défaut de la hauteur minimale), avec une valeur maximale à 25 mm
- Extrême : 10% de la « hauteur moyenne » (à défaut de la hauteur minimale), avec une valeur maximale à 50 mm
- ISO 4359 (pour information) : +/- 0.1% de la longueur

L'écart est calculé en considérant la valeur moyenne de l'altitude dans le chenal d'approche et l'altitude minimale dans le col (considérée comme le point de contrôle).

Remarque 1 : le fait de considérer l'altitude moyenne du chenal d'approche permet d'éviter de déclarer non-conforme des canaux avec des petits creux et des petites bosses.

Remarque 2 : la mesure du niveau du radier est réalisée au laser plan dans le chenal d'approche avec la même référence que la mesure du radier dans le col.

Remarque 3 : ces tolérances sont importantes et supposent que le zéro de la sonde de niveau est bien réalisé par rapport au radier du col du canal. A défaut, l'erreur sur le débit pourra être très importante.

3.4.13.3. Problématique des bosses dans le chenal d'approche

L'expérience de l'AERMC ainsi que les essais menés par l'AERMC avec des bosses dans le chenal d'approche permettent d'affirmer que :

- Des creux dans le chenal d'approche sont sans impact significatif sur la relation hauteur – débit, l'eau y formant une zone morte ;
- Des bosses dans le chenal d'approche peuvent impacter la relation hauteur – débit si elles sont très significatives (voir le graphique où les erreurs demeurent inférieures à 3% pour une bosse supérieure à 10% de la hauteur d'eau.

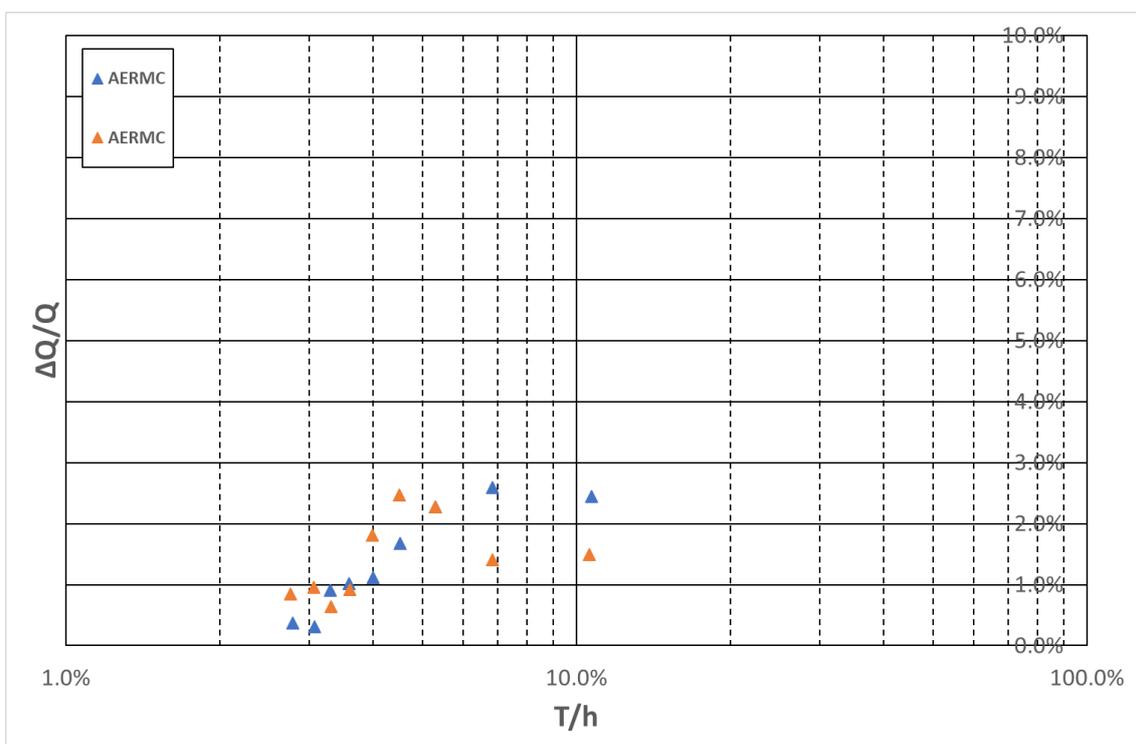


Figure 12. Erreur sur le débit en fonction de la taille T d'une bosse dans le chenal d'approche.

Ces constats conduiraient à ne pas déclarer non-conformes des canaux avec des creux ou des bosses dans le chenal d'approche. Afin de garantir une certaine qualité de génie civil, les tolérances suivantes sont cependant proposées :

- Raisonnable : 25 mm
- Extrême : 50 mm

L'écart est calculé en considérant la différence d'altitude entre le point considéré et le col, ainsi que la hauteur de pelle théorique, c'est-à-dire :

- La valeur absolue de la différence entre l'altitude locale dans le chenal d'approche et l'altitude minimale dans le col (point de contrôle hydraulique),
- La hauteur de pelle théorique du canal.

3.5. Mesurage de la hauteur

3.5.1. Dispositif et protocole de contrôle

- Présence d'un dispositif et/ou d'un protocole de vérification de la mesure de niveau ? Oui ou non (inspection visuelle et question à l'exploitant du site de mesure)

Le contrôleur doit juger si le dispositif et le protocole proposé permettent une bonne vérification de la mesure du niveau. Dans l'idéal, il vérifie le zéro de la sonde, canal à sec, ainsi que quelques hauteurs intermédiaires (au moins trois).

3.5.2. Distance entre la mesure et le début du convergent

La norme ISO 4359 recommande de mesurer entre 3 et 4 fois la hauteur maximale en amont du convergent. Cette condition permet de s'assurer que la zone de mesure n'est pas située trop près du convergent où l'écoulement accélère et où la hauteur d'eau diminue, ni trop loin auquel cas la perte de charge (frottement sur les parois) conduirait à augmenter la hauteur d'eau. L'analyse de lignes d'eau dans les chenaux d'approche réalisée sur base de modélisations hydrauliques 3D (étude des canaux Hydrologic) avait cependant permis de conclure que la relation hauteur – débit était impactée de façon négligeable pour une position de sonde à 1.5 fois la hauteur maximale.

Cette condition 3 à 4 fois h_{max} est en outre contreproductive car elle conduit à éloigner le point de mesure en amont et donc à limiter la longueur droite en amont du point de mesure, et donc potentiellement les perturbations hydrauliques.

Il est donc proposé :

- Mesure de la distance horizontale entre la sonde de mesure et le début du convergent
- Tolérances :
 - ISO 4359 : entre 3 et 4 fois h_{max}
 - Raisonnable : entre 1 et 5 fois h_{max}
 - Extrême : entre 0.5 et 6 fois h_{max}

Remarque : ces valeurs demeurent probablement sécuritaires et il est probable qu'une mesure réalisée entre 0 et 0.5 fois h_{max} ne sera pas empreinte d'une erreur supérieure à 5%.

4. CONCLUSION

Le protocole et le référentiel proposés ci-dessus s'appuient au maximum sur des éléments quantifiés sur base de l'état de l'art et de tests menés dans le cadre de cette étude. Pour autant, certaines tolérances proposées ont été choisies de façon en partie arbitraire (à défaut d'éléments quantifiés sur l'impact de tous les paramètres). De même, il a été choisi de ne pas intégrer de tolérance sur les dimensions dont l'impact sur la relation hauteur – débit est très faible (par exemple le convergent ou le divergent).

Ces éléments ne constituent cependant que des lignes directrices. Le contrôleur a tout loisir selon son analyse du site de compléter ces éléments par des remarques liés au site particulier qu'il est en train d'auditer.

Si une déformation qui ne serait pas mesurée avec le protocole proposé était constatée, il est probable que son impact sur la relation hauteur – débit soit négligeable. En cas de doute, il est proposé d'utiliser les tolérances suivantes, dont les valeurs sont vraisemblablement sécuritaires :

- Tolérance raisonnable : 5% de la largeur du col
- Tolérance extrême : 10% de la largeur du col

Les déformations présentes sur le convergent amont et visibles sur la figure suivante en constituent un bon exemple. Au vu de l'état de l'art, la forme du convergent impacte peu (cols courts) ou pas du tout (cols longs) la relation hauteur – débit. Il est donc raisonnable de penser que des déformations qui y seraient présentes ont un impact faible (cols courts) ou insignifiant (cols longs) sur la relation hauteur – débit. Le canal de la figure suivante étant un canal à col court, il est possible qu'il y ait un impact. Le contrôleur qui audite ce site de mesure peut donc mesurer l'amplitude de ces déformations et utiliser la tolérance mentionnée plus haut pour statuer.



Figure 13. Exemple de déformations non mesurées (entourées en bleu) avec le protocole proposé.

5. REFERENCES

Ackers P., White W.R., Perkins J.A., Harrison A.J.M. (1978). *Weirs and flumes for flow measurements*. John Wiley & Sons.

Bos M.G. (1989). *Discharge measurement structures*. ILRI.

Castro-Orgaz O. (2008). Hydraulic design of Khafagi flumes. *Journal of Hydraulic Research* 46:5, 691-698.

Clemmens A.J., Wahl T.L., Bos M.G., Replogle J.A. (2001). *Water measurement with flumes and weirs*. ILRI.

Dufresne M., Vazquez J. (2020). *Mesure du débit d'un écoulement à surface libre par un canal Venturi*. Guide technique accessible sur le site hydraulique-des-reseaux.eu

Environment Agency (2022). *Minimum requirements for self-monitoring of flow: MCERTS performance standard*. UK Government, accessible sur le site <https://www.gov.uk>

ISO (2023). *Structures de mesure du débit - Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U*. NF ISO 4359:2023.

Khafagi A (1942). *Der Venturikanal (Theorie and Anwendung)*. Thèse de doctorat de ETH Zürich.