

Guide technique

Programme de recherche MENTOR

Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage

Auteurs : José VAZQUEZ, Matthieu DUFRESNE, Martin FISCHER, Marie MANCEAU, Gilles ISENMANN et Jonathan WERTEL

Février 2016

Avec la participation de Maxence GRAEBLING, Gérald NEYRINCK et Nicolas SCHAEER

Résumé

Ce guide technique est un livrable du projet MENTOR acronyme de « MEasurement sites conception method for sewer NeTwORks » (en Français : Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement). Ce projet a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme ECOTECH Edition 2011 et s'est déroulé sur la période 2012 – 2016.

Ce guide propose des arbres de décisions simples et opérationnels dans l'objectif de :

- Classifier les différents types de déversoirs,
- Déterminer si le débit déversé est instrumentable à partir de la mesure de la lame déversante,
- Déterminer le moyen d'établir la relation hauteur/débit en privilégiant les lois les plus simples possibles.

I. Contexte et objectifs

Ce guide a pour objectif de proposer une méthodologie de diagnostic hydraulique des déversoirs de type : frontal, latéral et de forme quelconque, dans le cadre de leur autosurveillance. Chaque déversoir sera analysé en fonction de sa géométrie et du régime d'écoulement pour son instrumentation.

La finalité de ce guide est de permettre de faire un choix sur les moyens à mettre en œuvre en terme de calcul afin de proposer une instrumentation de l'ouvrage de déversement par la mesure de sa lame déversante.

La priorité sera donnée aux lois hydrauliques les plus simples possibles.

Table des matières

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS	2
II. LE DEVERSOIR FRONTAL	5
A. TYPE DE DEVERSOIR ET DIAGNOSTIC GEOMETRIQUE	5
B. DONNEES NECESSAIRES POUR LE DIAGNOSTIC	7
C. OBJECTIF DU DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE	8
D. METHODE DE CALCUL POUR LE DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE	13
1. GARANTIR UN ECOULEMENT FLUVIAL DANS LA CONDUITE AMONT	13
2. VERIFIER LE PASSAGE ENTRE LA CONDUITE AMONT ET LA CHAMBRE DU DEVERSOIR	14
3. VERIFIER UN ECOULEMENT RECTILIGNE PROVENANT DE L'AMONT	16
4. VERIFIER L'ENNOIEMENT DU DEVERSOIR PAR LA CONDUITE DE DECHARGE	18
5. VERIFIER LA VITESSE DE LA CONDUITE AVAL CONSERVEE	21
E. BILAN DU DIAGNOSTIC	22
F. LOIS HYDRAULIQUES UTILISABLES	23
1. DEVERSOIR RECTANGULAIRE A CRETE MINCE SANS CONTRACTION LATERALE EN DENOYE ET AERE	24
2. DEVERSOIR RECTANGULAIRE A CRETE MINCE AVEC CONTRACTION LATERALE EN DENOYE	25
3. SEUIL EPAIS RECTANGULAIRE DENOYE SANS CONTRACTION LATERALE	27
G. POSITION DU POINT DE MESURE	28
H. EXEMPLE DE DIAGNOSTIC D'UN DEVERSOIR FRONTAL	28
III. LE DEVERSOIR LATERAL	32
A. TYPE DE DEVERSOIR ET DIAGNOSTIC GEOMETRIQUE	32
B. DONNEES NECESSAIRES POUR LE DIAGNOSTIC	34
C. OBJECTIF DU DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE	34
D. BILAN DU DIAGNOSTIC	38
IV. CAS DES AUTRES DEVERSOIRS	39
A. INTRODUCTION	39
B. LE DEVERSOIR GEOMETRIQUEMENT COMPLEXE EST-IL INSTRUMENTABLE A PARTIR D'UNE MESURE DE NIVEAU D'EAU ?	40
1. RISQUE DE RESSAUT HYDRAULIQUE	41
2. PRECISION DE LA MESURE	44
C. DETERMINATION DE LA RELATION HAUTEUR / DEBIT	46
V. REFERENCES	47

II. Le déversoir Frontal

A. Type de déversoir et diagnostic géométrique

Le **déversoir frontal** est constitué d'une **crête rectiligne et perpendiculaire à l'écoulement de la conduite amont**.

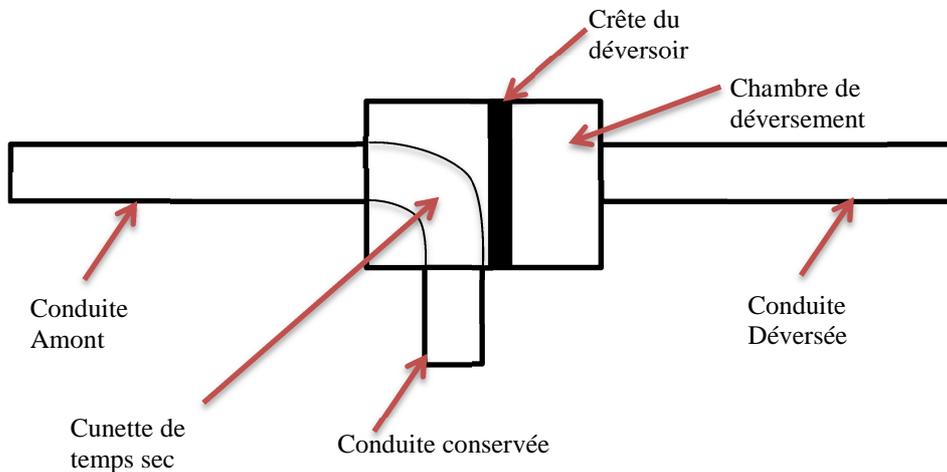


Figure 1 : Déversoir frontal vue de dessus

Parmi les déversoirs à seuils frontaux, on peut encore établir une sous-catégorie selon :

- **La présence ou non d'une contraction au niveau du seuil :**
 - Seuil frontal sans contraction, lorsque la longueur du seuil est égale à la largeur de l'ouvrage de déversement,

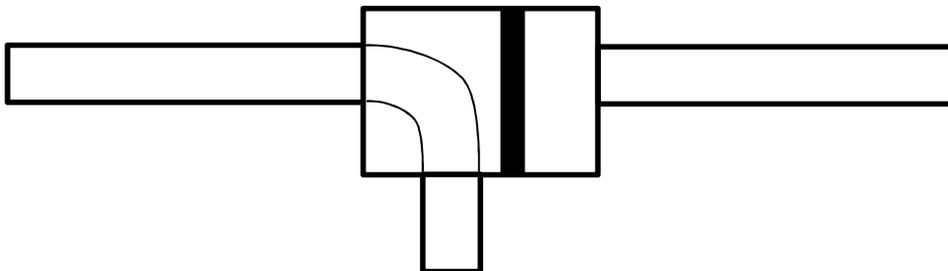


Figure 2 : Déversoir frontal sans contraction latérale

- Seuil frontal avec contraction, lorsque la longueur du seuil est inférieure à la longueur de l'ouvrage de déversement,

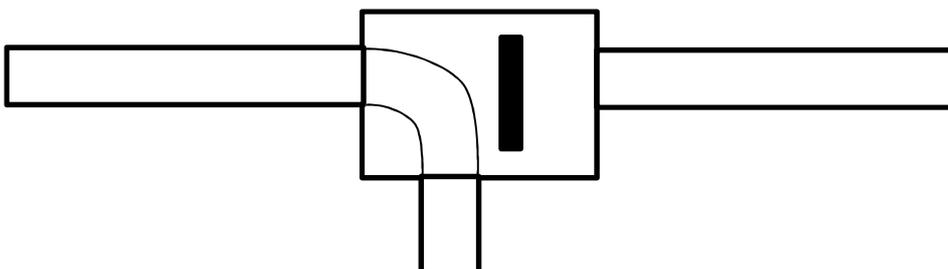


Figure 3 : Déversoir frontal avec contraction latérale

- **La hauteur de la crête par rapport à la hauteur de la conduite aval conservée :**
 - Déversoir à crête haute : la hauteur de la crête est supérieure à la hauteur de la conduite aval conservée ; la mise en charge de cette conduite est nécessaire pour le déversement,

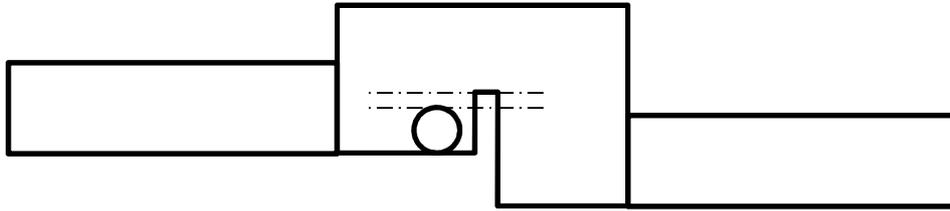


Figure 4 : Déversoir frontal à crête haute

- Déversoir à crête basse : la hauteur de la crête est inférieure à la hauteur de la conduite aval conservée,

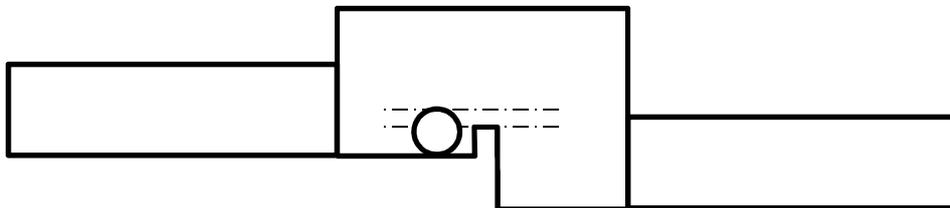


Figure 5 : Déversoir frontal à crête basse

- **L'orientation de la conduite aval conservée par rapport à la crête :**
 - Conduite aval dans l'axe de la conduite amont,

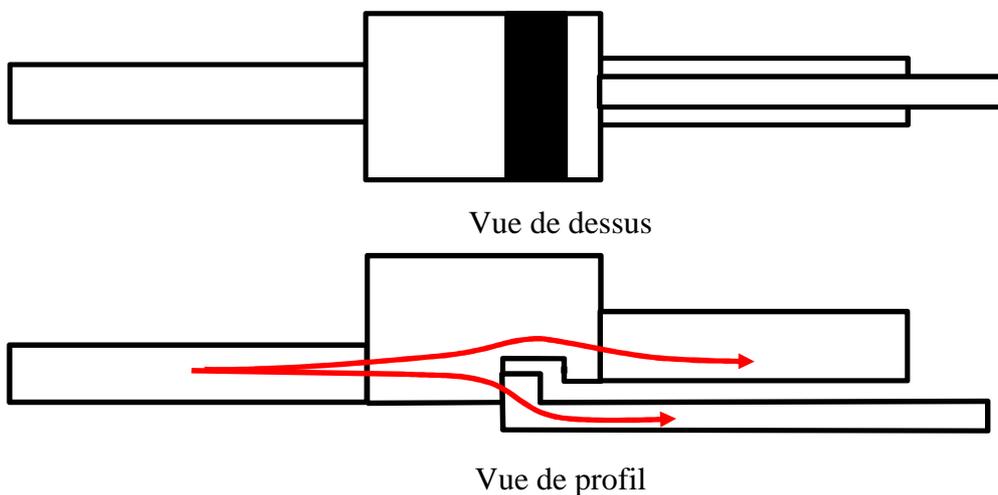


Figure 6 : Déversoir frontal avec conduite aval dans l'axe de la conduite amont

- Conduite aval dans l'axe de la crête,

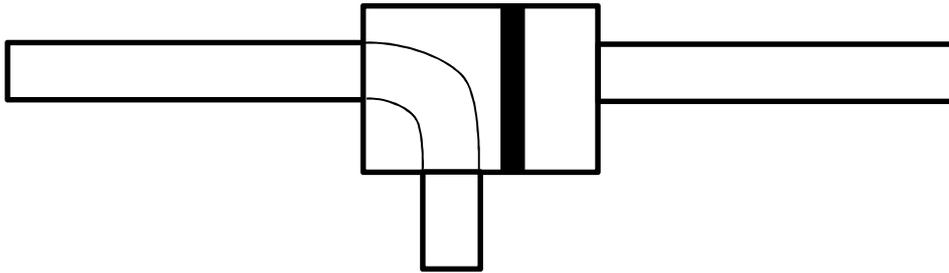


Figure 7 : Déversoir frontal avec conduite aval dans l'axe de la crête

- **L'épaisseur de la crête de déversement :**
 - Seuil à crête mince,
 - Seuil à crête épaisse.

Chaque particularité géométrique et hydraulique conditionne la loi hydraulique à appliquer.

B. Données nécessaires pour le diagnostic

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des données nécessaires au diagnostic hydraulique du déversoir frontal.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Amont	Profil en long sur environ 100m en amont	<ul style="list-style-type: none"> • Type de conduite (DN, Ovoïde,...) • Pentes • Changement de direction
Crête	Données géométriques Ouvrage de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude de la crête (NGF) • Fil de l'eau de la conduite amont en entrée du déversoir (NGF) • Fil de l'eau de la conduite aval en sortie déversée du déversoir (NGF) • Longueur de crête • Epaisseur de crête • Contraction latérale • Type d'ouvrage de contrôle (vanne, ouverture de la vanne...)
Aval conservé	Profil en long conservé sur environ 100m en aval	<ul style="list-style-type: none"> • Type de conduite (DN, Ovoïde,...) • Pente
Aval déversé	Profil en long sur environ 100m en aval déversé	<ul style="list-style-type: none"> • Type de conduite (DN, Ovoïde,...) • Pente

C. Objectif du diagnostic hydraulique

Le fonctionnement hydraulique d'un déversoir frontal s'apparente au fonctionnement des seuils. On distingue plusieurs cas selon la forme du seuil déversant, la configuration et la contraction éventuelle de la nappe déversante.

Dans l'objectif d'utiliser les lois classiques hydrauliques d'un seuil, il est nécessaire de garantir et de vérifier quelques contraintes hydrauliques :

- **Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont** du déversoir,

Le déversoir et la conduite amont doivent être pilotés d'un point de vue hydraulique par la crête du déversoir. La figure suivante montre la ligne d'eau et les régimes d'écoulement nécessaires. Si la conduite amont est à pente faible, on peut garantir un écoulement fluvial dans celle-ci.

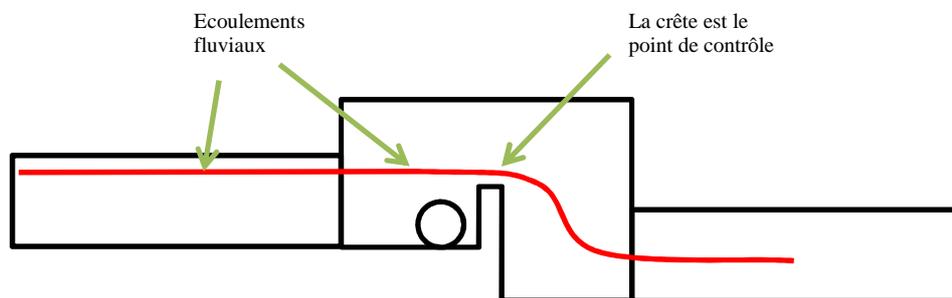


Figure 8 : Ecoulement fluvial dans la conduite amont

Dans le cas d'un écoulement amont arrivant en torrentiel, trois possibilités peuvent se présenter :

- *Un ressaut hydraulique dans la conduite amont.* Si le ressaut est proche de la chambre du déversoir, il peut générer des oscillations de la surface libre pouvant perturber la zone de mesure de la lame déversante. La position du ressaut est à localiser.

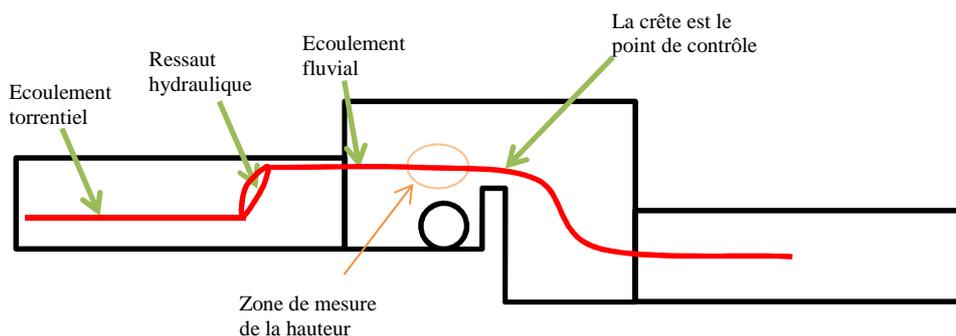


Figure 9 : Ressaut dans la conduite amont

- *Un ressaut dans la chambre du déversoir.* Dans ce cas, le ressaut génère des oscillations de la surface libre qui perturbent la zone de mesure de la lame déversante.

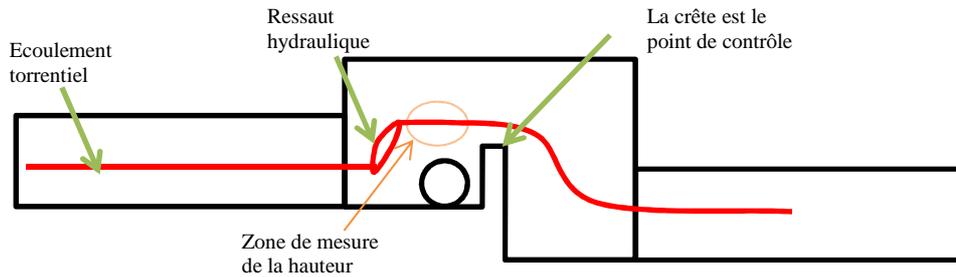


Figure 10 : Ressaut dans la chambre du déversoir

- *Un déversoir fonctionnant en torrentiel.* L'évaluation du débit déversé par la mesure de la hauteur d'eau n'est pas conseillée. Aucune formule actuelle n'est disponible pour ce type d'écoulement.

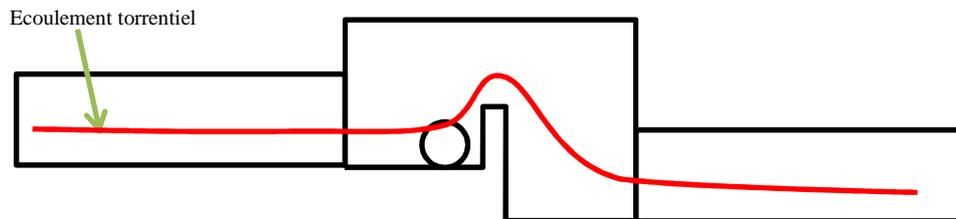


Figure 11 : Ecoulement torrentiel dans tout l'ouvrage

- **Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir.** Pour vérifier cette contrainte, il sera nécessaire d'avoir un écoulement fluvial dans la conduite amont afin de garantir une arrivée dans la chambre du déversoir en régime fluvial.

En fonction de la hauteur de crête du déversoir trois possibilités peuvent apparaître :

- *Une hauteur de crête importante.* Dans ce cas, l'écoulement fluvial amont pourra se maintenir dans le déversoir. Les lois hydrauliques de seuil pourront être utilisées.

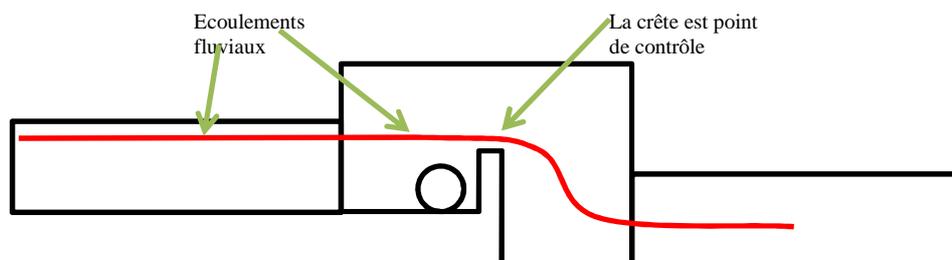


Figure 12 : Ecoulement fluvial dans la conduite amont

- *Une hauteur de crête faible.* Dans ce cas, l'écoulement fluvial amont passera par la hauteur critique en entrée de la chambre du déversoir. L'écoulement passera en torrentiel dans le déversoir et un ressaut hydraulique peut se former en tête de crête.

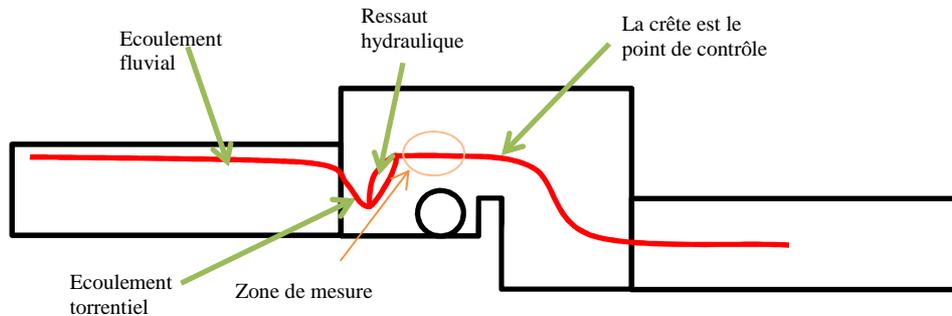


Figure 13 : Ressaut dans la chambre du déversoir

- *Une hauteur de crête très faible.* Dans ce cas, l'écoulement fluvial amont passera par la hauteur critique en entrée de la chambre du déversoir. L'écoulement passera en torrentiel dans le déversoir et restera torrentiel.

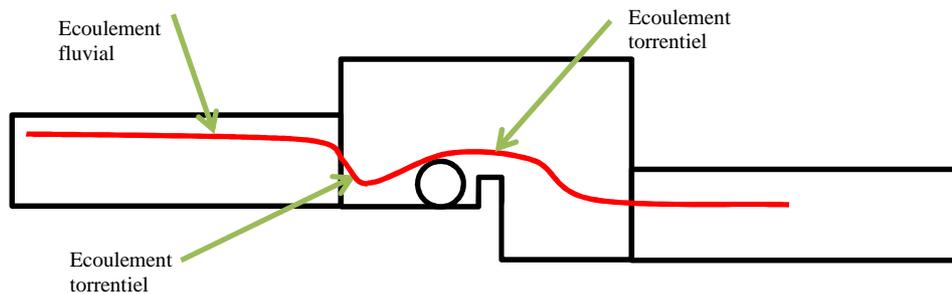


Figure 14 : Écoulement torrentiel dans la chambre du déversoir

- **Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont.** L'existence d'un coude en amont du déversoir peut engendrer un champ de vitesse complexe en amont du déversoir et une perturbation hydraulique importante. Ce comportement hydraulique ne permet pas de garantir les lois hydrauliques classiques.

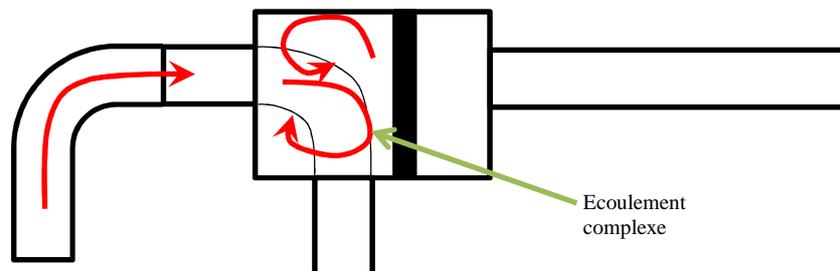


Figure 15 : Déversoir frontal avec coude en amont

En raison de la courbure de la conduite, un mouvement hélicoïdal des lignes de courant peut s'établir. La présence de ce mouvement de rotation persiste sur une

longueur en aval du coude. Lorsque la courbure et les vitesses sont importantes, des zones de recirculation peuvent apparaître. Le mécanisme interne de l'écoulement au travers d'un coude n'est pas encore bien connu, malgré le grand nombre de chercheurs qui ont analysé cet élément important.

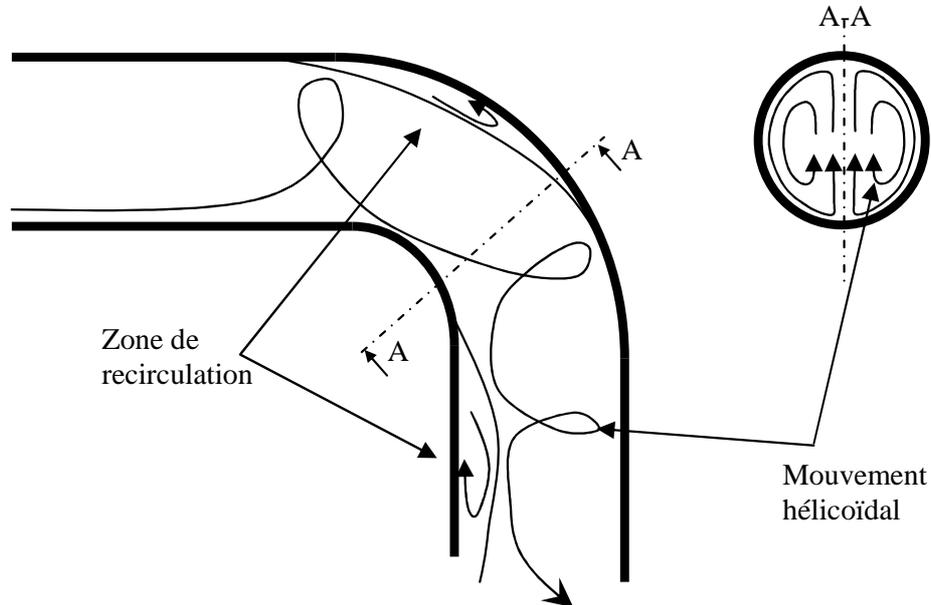


Figure 16 : Evolution des lignes de courant dans un coude circulaire

- **Vérifier l'ennoiement du déversoir par la conduite de décharge.** L'évacuation de l'écoulement par la conduite de décharge peut engendrer une élévation de la ligne d'eau dans la chambre de déversement. Plusieurs possibilités peuvent apparaître :
 - La chambre de déversement n'influence pas l'écoulement au niveau de la crête de déversement. Dans ce cas le seuil est dénoyé.

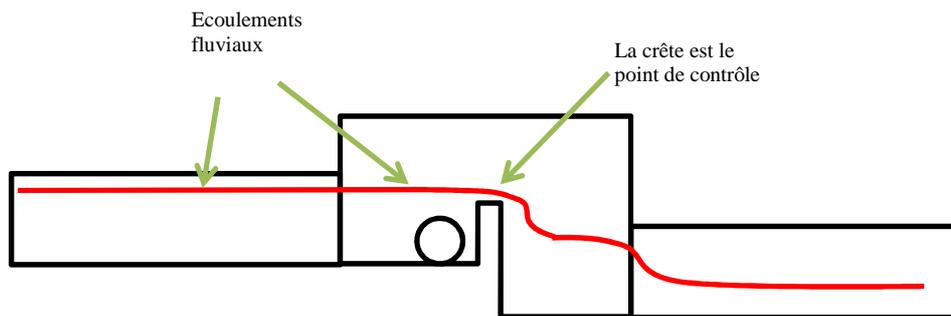


Figure 17 : seuil dénoyé

- La chambre de déversement influence l'écoulement au niveau de la crête de déversement. Dans ce cas le seuil est noyé.

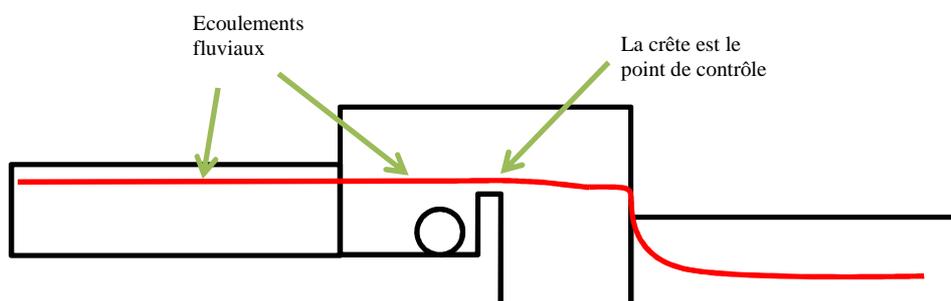


Figure 18 : seul noyé

- **Vérifier la vitesse dans la conduite aval conservée.** Le calcul consiste à vérifier que la conduite aval conservée ne présente pas un écoulement générant une énergie cinétique importante pour ne pas favoriser un creusement de la surface libre au droit de l'entrée de l'eau dans la conduite aval conservée.

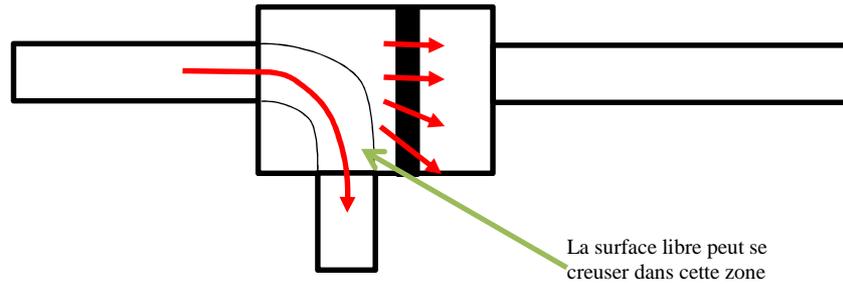


Figure 19 : Déversoir frontal avec vitesse importante à l'aval

D. Méthode de calcul pour le diagnostic hydraulique

Ce chapitre a pour objectif de fournir une méthodologie ainsi que les formules nécessaires pour vérifier l'ensemble des contraintes hydrauliques précédemment énoncées. Le choix des limites proposées prend en compte une sécurité qui garantit la contrainte hydraulique mais qui n'est pas optimale. En d'autres termes, il est possible de garantir ces contraintes en diminuant les limites proposées mais l'étude hydraulique est plus complexe. En fonction des résultats du diagnostic proposé, cette étude pourra se faire dans un deuxième temps.

1. Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont

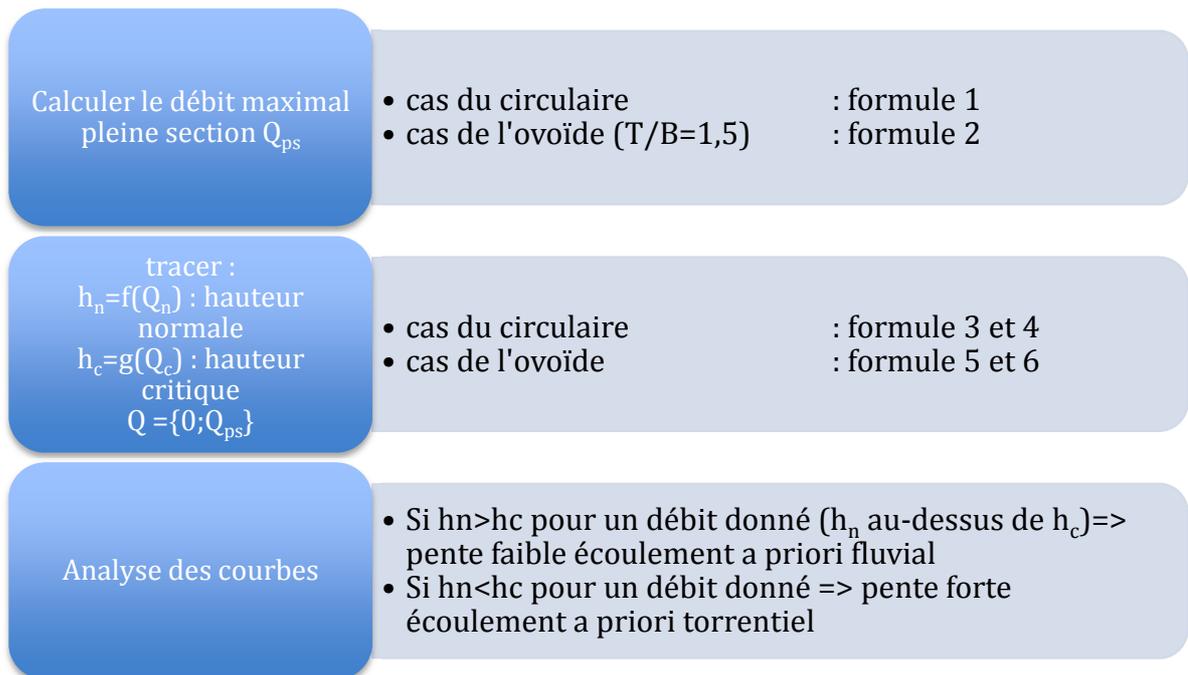
Les données nécessaires sont indiquées en rouge.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Amont	Profil en long sur environ 100m en amont	<ul style="list-style-type: none"> • Type de conduite (DN, Ovoïde,...) • Pentes

Remarque : on pourra choisir une rugosité de l'ordre de 70 en Strickler conformément à la norme NF EN 752.

Le calcul consiste à vérifier que l'écoulement arrivant en amont du déversoir est fluvial.

Pour chaque conduite amont :



Formule 1 Débit pleine section Circulaire	$Q_{ps} = 0,312 \cdot \sqrt{I} \cdot K_s \cdot DN^{8/3}$	I : pente (m/m) K _s : Rugosité de Strickler DN : diamètre pour un circulaire (m)
Formule 2 Débit pleine section Ovoïde	$Q_{ps} = 0,171 \cdot \sqrt{I} \cdot K_s \cdot T^{8/3}$	T : hauteur maximale pour un ovoïde (rapport hauteur/Largeur=1,5) (m)
Formule 3 h _n =f(Q _n) Circulaire	$h_n = 0,926 \cdot DN \cdot \left(1 - \left(1 - 3,11 \cdot \frac{Q_n}{\sqrt{I} \cdot K_s \cdot DN^{8/3}} \right)^{0,5} \right)^{0,5}$	Tracer pour la gamme du débit pleine section
Formule 4 h _c =g(Q _c) Circulaire	$h_c = \left(\frac{Q_c}{\sqrt{g \cdot DN}} \right)^{0,5}$	Tracer pour la gamme du débit pleine section
Formule 5 h _n =f(Q _n) Ovoïde	$h_n = 1,09 \cdot DN \cdot \left(1 - \left(1 - 0,88 \cdot \frac{Q_n}{\sqrt{I} \cdot K_s \cdot T^{8/3}} \right)^{0,5} \right)^{0,5}$	Tracer pour la gamme du débit pleine section
Formule 6 h _c =g(Q _c) Ovoïde	$h_c = 1,34 \cdot \left(\frac{Q_c}{\sqrt{g \cdot T}} \right)^{0,5}$	Tracer pour la gamme du débit pleine section

En fonction du tracé précédemment réalisé, l'analyse est la suivante :

- Si l'ensemble des conduites amont sont à pente faible alors **l'écoulement fluvial est garanti à l'amont du déversoir.**
- Si la conduite en amont du déversoir est à pente faible et que l'une des autres conduites amont est à pente forte alors il y a risque d'écoulement torrentiel en entrée de déversoir. **Il est nécessaire de positionner le ressaut hydraulique pour garantir le régime d'écoulement.**
- Si la conduite en amont du déversoir est à pente forte indépendamment du régime des autres conduites plus en amont alors l'écoulement est torrentiel en entrée de déversoir.

Si l'écoulement est fluvial en entrée du déversoir, la conduite amont génère un écoulement favorable à l'application des formules classiques de seuil.

2. Vérifier le passage entre la conduite amont et la chambre du déversoir

Les données nécessaires sont indiquées en rouge.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Amont	Profil en long sur trois regards amont (environ 100m)	• Type de conduite (DN, Ovoïde,...)
Crête	Données géométriques Ouvrage de contrôle	• Altitude de la crête (NGF) • Fil de l'eau de la conduite amont en entrée du déversoir (NGF)

Le calcul consiste à vérifier que la charge hydraulique minimale provenant de **la conduite en amont du déversoir** est inférieure à la hauteur de crête du déversoir. Cette vérification n'est utile que si l'écoulement amont est fluvial. Dans le cas d'un écoulement amont torrentiel, le déversoir n'est pas propice à une instrumentation par des lois simples.

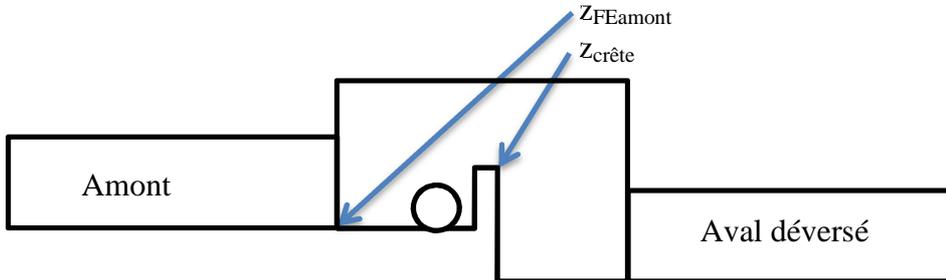


Figure 20 : Définition des différentes altitudes

Calculer le débit maximal pleine section Q_{ps}	<ul style="list-style-type: none"> •cas du circulaire : formule 1 •cas de l'ovoïde ($T/B=1,5$) : formule 2
tracer : $H=f(Q)$: Charge $Q = \{0; Q_{ps}\}$	<ul style="list-style-type: none"> •cas du circulaire : formule 7 •cas de l'ovoïde : formule 8
Analyse des courbes	<ul style="list-style-type: none"> •Si $H <$ Altitude de la crête \Rightarrow écoulement a priori fluvial •Si $H >$ Altitude de la crête \Rightarrow écoulement a priori torrentiel avec un ressaut possible

<p>Formule 7 H=j(Q) section Circulaire</p>	$H = z_{FEAmont} + h + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2}$ $S = \frac{4}{3} \cdot DN^2 \cdot \left(\frac{h}{DN}\right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{h}{4 \cdot DN} - \frac{4}{25} \cdot \left(\frac{h}{DN}\right)^2\right)$	<p>$z_{FEAmont}$ = Fil de l'eau de la conduite amont en entrée du déversoir (NGF) DN : diamètre pour un circulaire (m)</p>
<p>Formule 8 H=j(Q) section Ovoïde</p>	$H = z_{FEAmont} + h + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2}$ $h = 1,34 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot T}}\right)^{0,5}$ $S = 0,695 \cdot T^2 \cdot \left(\frac{h}{T}\right)^{1,5} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \frac{h}{T} - 0,10 \cdot \left(\frac{h}{T}\right)^2\right)$	<p>$z_{FEAmont}$ = Fil de l'eau de la conduite amont en entrée du déversoir (NGF) T : hauteur maximale pour un ovoïde (rapport hauteur/Largeur=1,5) (m)</p>

En fonction du tracé précédemment réalisé, l'analyse est la suivante :

- Si la charge (H) amont est inférieure à l'altitude de la crête alors l'écoulement est entièrement piloté par la crête ; il est donc fluvial à l'amont du déversoir.
- Si la charge (H) amont est supérieure à l'altitude de la crête alors l'écoulement passe par la hauteur critique à l'entrée du déversoir ; un écoulement torrentiel peut s'établir en amont de la crête.

Si l'écoulement est fluvial en entrée du déversoir, la conduite amont génère un écoulement favorable à l'application des formules classiques de seuil.

3. Vérifier que l'écoulement est rectiligne provenant de l'amont

Les données nécessaires sont indiquées en rouge.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Amont	Profil en long sur trois regards amont (environ 100m)	<ul style="list-style-type: none"> • Changement de direction

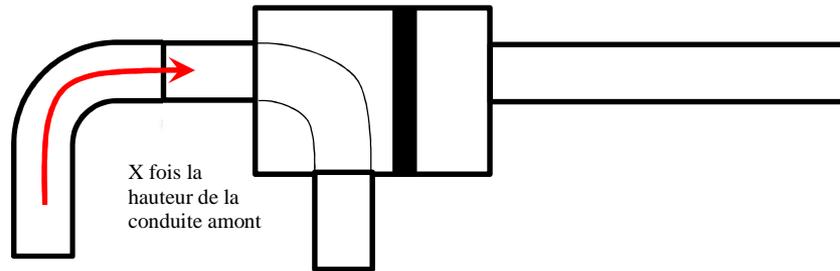


Figure 21 : Longueur de la conduite amont après le coude

L'existence d'un coude en amont du déversoir peut engendrer un champ de vitesse complexe en amont du déversoir et une perturbation importante de la surface libre qui ne permet pas de garantir les lois hydrauliques classiques. La surface libre dans la conduite après le coude peut engendrer une ondulation qui peut avoisiner les 10cm en hauteur d'eau.

En fonction du nombre de Froude de l'écoulement, il est nécessaire de garantir une longueur droite de la conduite amont en entrée du déversoir. En première approche, on pourra estimer que cette longueur droite peut être limitée à 5 fois le diamètre si l'écoulement en amont du coude à un nombre de Froude inférieur à 0,5. Dans le cas où le nombre de Froude est entre 0,5 et 1 en amont du coude, on pourra prendre une longueur de 50 fois le diamètre.

Calculer le débit maximal pleine section Q_{ps}	<ul style="list-style-type: none"> •cas du circulaire : formule 1 •cas de l'ovoïde (T/B=1,5) : formule 2
Calculer le nombre de Froude à l'amont $Q = \{0; Q_{ps}\}$	<ul style="list-style-type: none"> •cas du circulaire : formule 9 •cas de l'ovoïde : formule 10

<p>Formule 9 Fr=j(Q) section Circulaire</p>	$h_n = 0,926. DN. \left(1 - \left(1 - 3,11. \frac{Q_n}{\sqrt{I}. K_s. DN^{8/3}} \right)^{0,5} \right)^{0,5}$ $Fr = \frac{Q}{\sqrt{g. h_n^4. DN}}$	<p>DN : diamètre pour un circulaire (m)</p>
<p>Formule 10 Fr=j(Q) section Ovoïde</p>	$h_n = 1,09. DN. \left(1 - \left(1 - 0,88. \frac{Q_n}{\sqrt{I}. K_s. T^{8/3}} \right)^{0,5} \right)^{0,5}$ $Fr = 1,8. \frac{Q}{\sqrt{g. h_n^4. T}}$	<p>T : hauteur maximale pour un ovoïde (rapport hauteur/Largeur=1,5) (m)</p>

En fonction du tracé précédemment réalisé, l'analyse est la suivante :

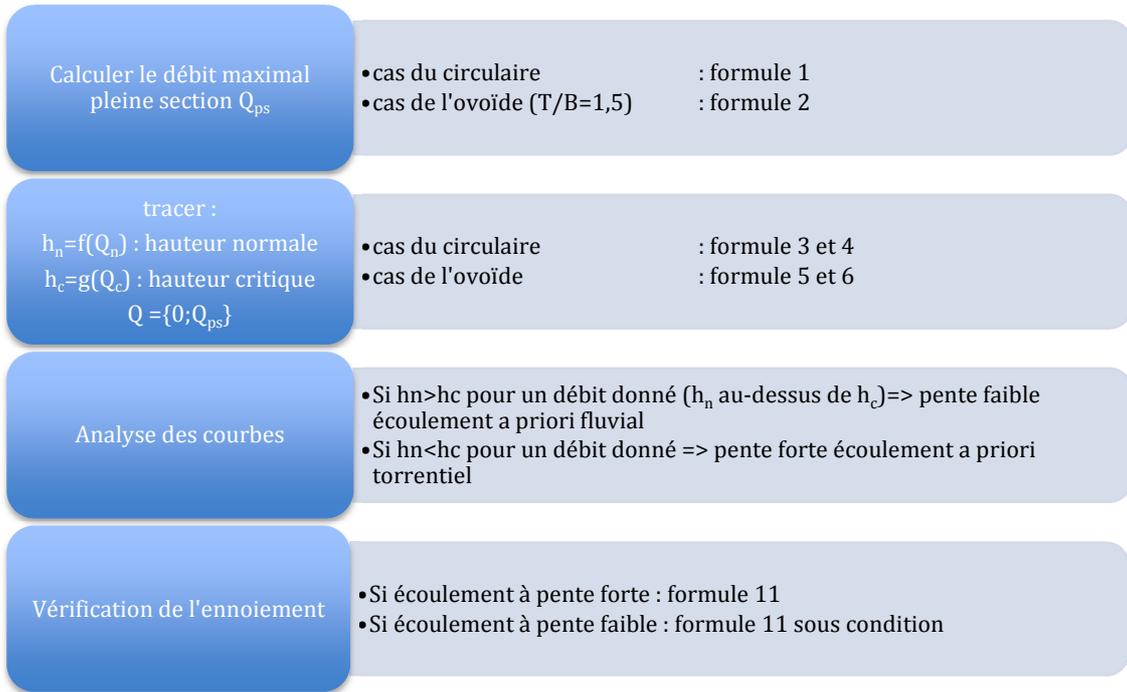
- Si le nombre de Froude amont est inférieure à 0,5 alors la longueur droite en amont du déversoir peut être limitée à 5 fois le diamètre.
- Si le nombre de Froude amont est supérieur à 0,5 alors la longueur droite en amont du déversoir doit peut-être supérieure à 50 fois le diamètre.

4. Vérifier l'ennoiement du déversoir par la conduite de décharge

Les données nécessaires sont indiquées en rouge.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Crête	Données géométriques Ouvrage de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude de la crête (NGF) • Fil de l'eau de la conduite aval en sortie déversée du déversoir (NGF)
Aval déversé	Profil en long sur environ 50m en aval déversé	<ul style="list-style-type: none"> • Type de conduite (DN, Ovoïde,...) • Pente

Le calcul consiste à vérifier que la charge hydraulique provenant de **l'entonnement de la partie déversée** et de la **conduite en aval déversée du déversoir** est inférieure à la hauteur de crête du déversoir.



En fonction du tracé précédent, l'analyse est la suivante :

- Si l'écoulement est torrentiel dans la conduite de décharge, c'est l'entonnement qui risque de piloter le niveau d'eau dans la chambre de déversement.

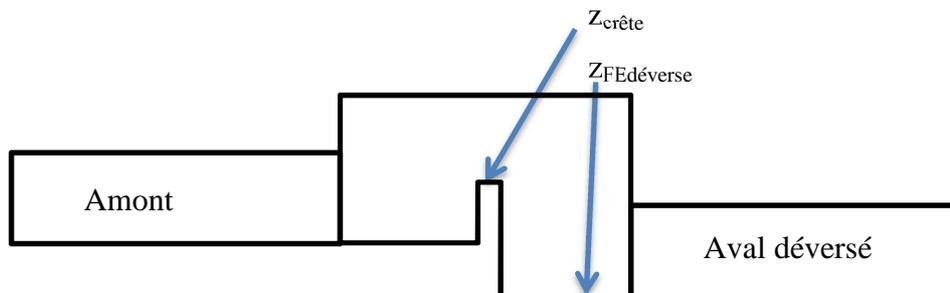


Figure 22 : Définition des différentes altitudes

Dans ce cas, on pourra vérifier pour le débit déversé maximal amont que :

$$z_{\text{crête}} > z_{\text{FEdév}} + h_{\text{dev}}$$

On utilisera la formule 11.

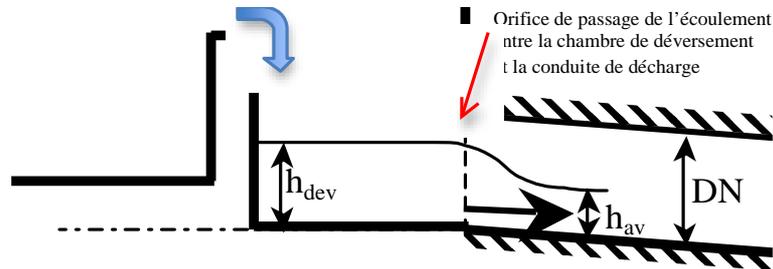


Figure 23 : Définition de h_{dev}

<p>Formule 11 H=j(Q) section Circulaire</p>	<p>$Q_{\text{déversé}}$ $= 0,7157 \cdot (9,81 \cdot \text{DN}^5)^{0,5} \cdot 0,5 \left(\frac{h_{\text{dev}}}{\text{DN}}\right) \cdot \left(\frac{h_{\text{dev}}}{\text{DN}}\right)^{2,1747}$</p>	<p>h_{dev} = hauteur d'eau dans la chambre de déversement DN : diamètre pour un circulaire (m)</p>
--	--	--

Dans le cas des conduites non circulaires, on pourra les approcher par une conduite circulaire ayant la même surface de passage.

- Si l'écoulement est fluvial dans la conduite de décharge, il est nécessaire de vérifier si l'orifice de passage de l'écoulement entre la chambre de déversement et la conduite de décharge est noyé. Afin de garantir un fonctionnement en dénoyé de cet orifice, il est nécessaire que :

$$h_{\text{av}} \leq 0,73 \cdot h_{\text{dev}}$$

h_{av} représente la hauteur normale dans la conduite de décharge pour le débit déversé.

Si cette condition est respectée, on pourra utiliser la formule 11 et on pourra vérifier pour le débit déversé maximal que :

$$z_{\text{crête}} > z_{\text{FEdév}} + h_{\text{dev}}$$

Si cette condition est vérifiée alors le déversoir est noyé et on pourra utiliser les formules classiques de déversement.

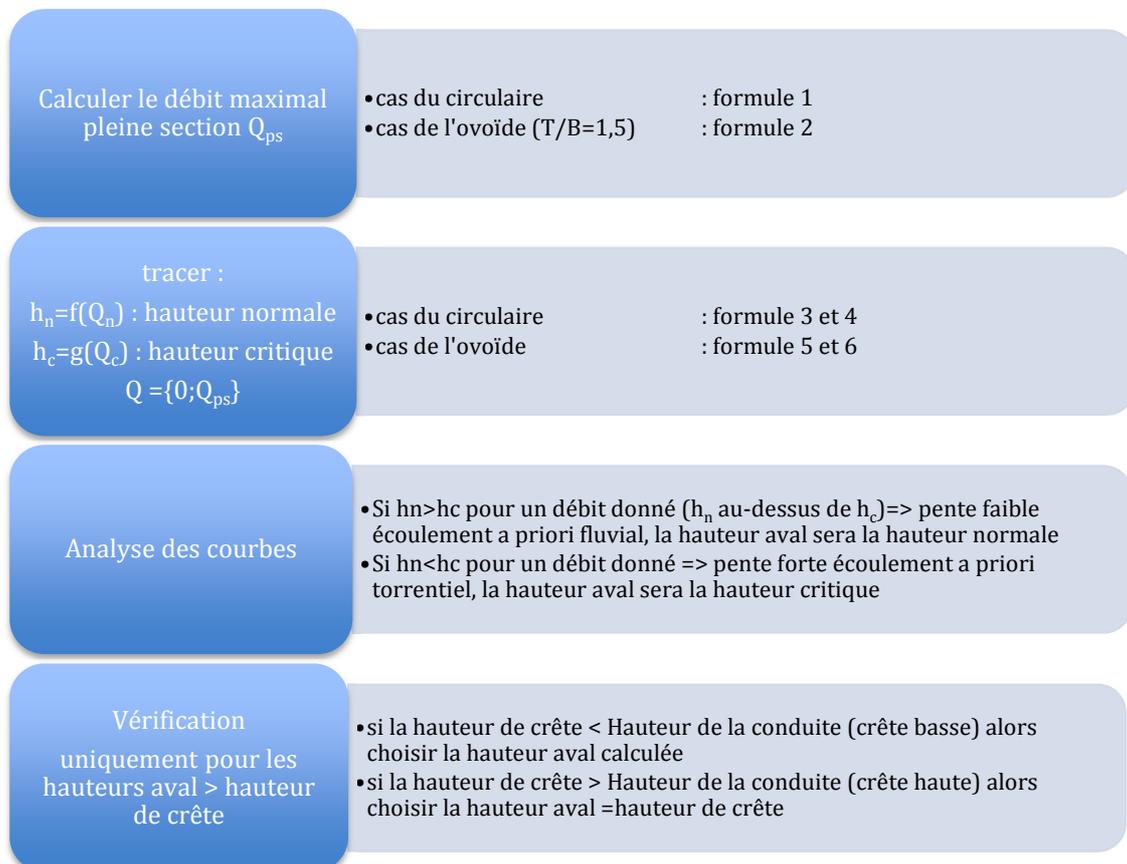
- Dans le cas où $z_{\text{crête}} < z_{\text{FEdév}} + h_{\text{dev}}$ est vérifiée, c'est l'orifice de passage de l'écoulement entre la chambre de déversement et la conduite de décharge qui pilote le niveau d'eau. En respectant la condition : $h_{\text{av}} \leq 0,73 \cdot h_{\text{dev}}$ avec h_{av} représentant la hauteur normale dans la conduite de décharge pour le débit déversé, la formule 11 peut alors être utilisée pour évaluer le débit déversé.

5. Vérifier la vitesse de la conduite aval conservée

Les données nécessaires sont indiquées en rouge.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Crête	Données géométriques Ouvrage de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> Altitude de la crête (NGF)
Aval conservé	Profil en long sur environ 100m en aval conservé	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite (DN, Ovoïde,...) Pente Hauteurs en NGF

Le calcul consiste à vérifier que la conduite aval conservée ne présente pas un écoulement générant une énergie cinétique importante pour ne pas favoriser un creusement de la surface libre au droit de l'entrée de l'eau dans la conduite aval conservée. Pour cela, on limitera la vitesse à 0,5m/s soit une énergie cinétique maximale équivalente à 1,3cmCE.



- Cas du déversoir à crête basse : Hauteur de conduite aval conservée > hauteur de crête. La vérification consiste à calculer la vitesse dans la conduite aval conservée pour le débit maximal de cette conduite.
- Cas du déversoir à crête haute : Hauteur de conduite aval conservée < hauteur de crête. La vérification consiste à calculer la vitesse dans la section aval conservée du déversoir pour le débit maximal de cette conduite. La forme de la conduite sera un U.

Calcul de la surface d'une section en U (circulaire en pied) :

$$S = DN.h - 0,1073.DN^2$$

Calcul de la surface d'une section en U (ovoïde en pied) :

$$S = 0,324.T^2 + 0,67.T.(h - 0,67.T)$$

E. Bilan du diagnostic

On rappelle que la finalité de ce guide est de permettre de faire un choix sur les moyens à mettre en œuvre en terme de calcul afin de proposer une instrumentation de l'ouvrage de déversement par la mesure de sa lame déversante.

La priorité est donnée aux lois hydrauliques les plus simples possibles. Pour cela, il est nécessaire de :

- **Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont** du déversoir pour rendre applicable l'ensemble des formules disponibles.
- **Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir.** Ce passage peut favoriser l'apparition d'un changement de régime en amont de la crête au moment du déversement,
- **Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont,**
- **Vérifier l'ennoiement du déversoir par la conduite de décharge.**
- **Vérifier la vitesse de la conduite aval conservée.**

Dans le cas où l'une des conditions hydrauliques précédentes n'est pas garantie, il est conseillé de réaliser une analyse hydraulique approfondie de l'ouvrage afin de mieux comprendre les contraintes hydrauliques non vérifiées. En fonction du diagnostic, il peut être envisagé :

- Soit une modification géométrique simple de l'ouvrage afin de permettre une utilisation des relations hydrauliques classiques ou une modélisation 3D simplifiée.
- Soit une modélisation 3D de l'ouvrage si le diagnostic hydraulique permet de garantir l'instrumentation mais avec une loi fournie par la modélisation 3D,
- Soit un autre moyen d'instrumentation qu'une mesure de la lame déversante,
- Soit une reconstruction complète de l'ouvrage.

F. Lois hydrauliques utilisables

Si les conditions hydrauliques précédentes sont garanties alors il est envisageable de choisir une loi de seuil du type :

- Déversoir rectangulaire à crête mince sans contraction latérale en régime dénoyé et en régime aéré,
- Déversoir rectangulaire à crête mince avec contraction latérale en régime dénoyé,
- Déversoir à crête épaisse.

Les seuils minces et épais doivent être distingués dans la mesure où ils ne présenteront pas la même loi hauteur – débit. Le CETMEF propose les critères donnés dans le tableau suivant et illustrés sur les figures suivantes (CETMEF 2005).

Seuil mince	Seuil épais
$C < \frac{H_1}{2}$	$C > \frac{2H_1}{3}$

Figure 24 : Critères de définition d'un seuil mince et d'un seuil épais (CETMEF 2005).

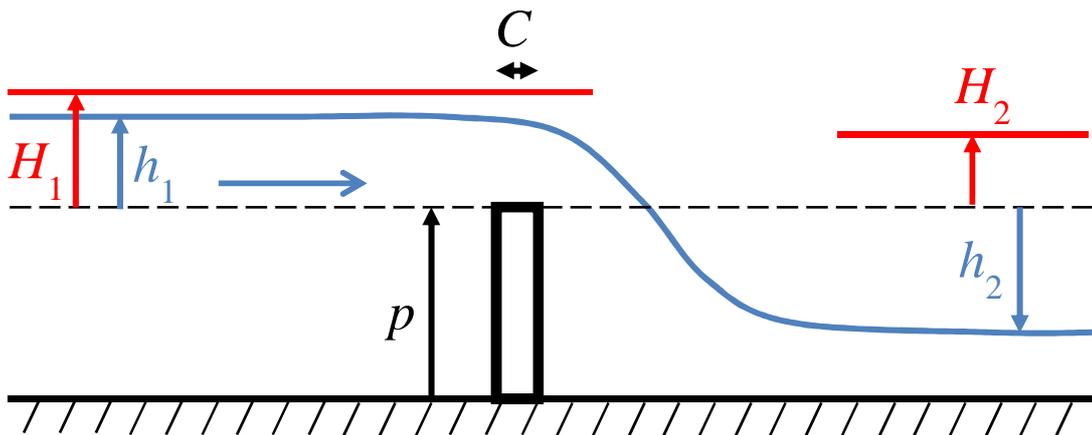


Figure 25 : Ecoulement correspondant à un seuil mince.

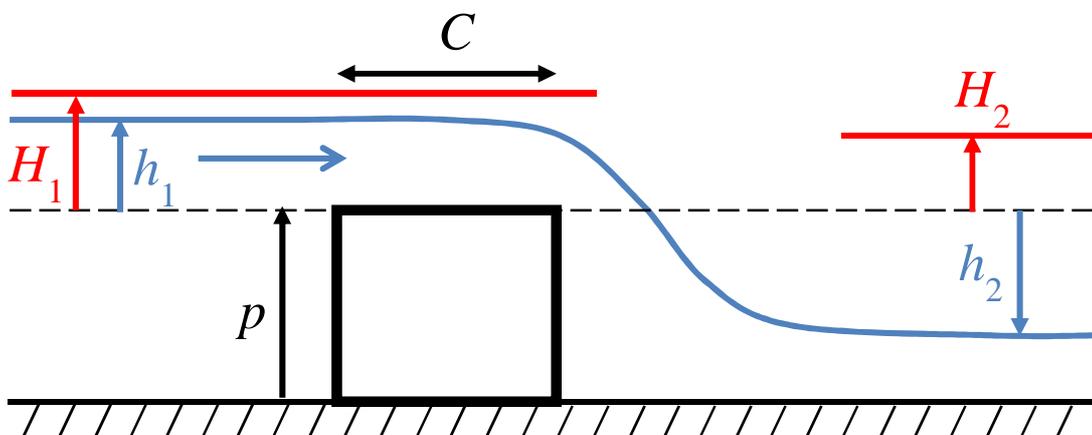


Figure 26 : Ecoulement correspondant à un seuil épais.

Le caractère mince ou épais est donc une caractéristique hydraulique – et pas seulement géométrique – dans la mesure où la charge amont H_1 intervient. La loi du seuil, autrement dit la relation entre le débit et la hauteur d'eau amont, dépend du caractère mince ou épais de la crête.

Dans le cas d'un seuil n'étant ni mince ni épais ($\frac{H_1}{2} < C < \frac{2H_1}{3}$), aucune loi ne peut être utilisée *a priori*. Une étude spécifique est alors nécessaire.

1. Déversoir rectangulaire à crête mince sans contraction latérale en dénoyé et aéré

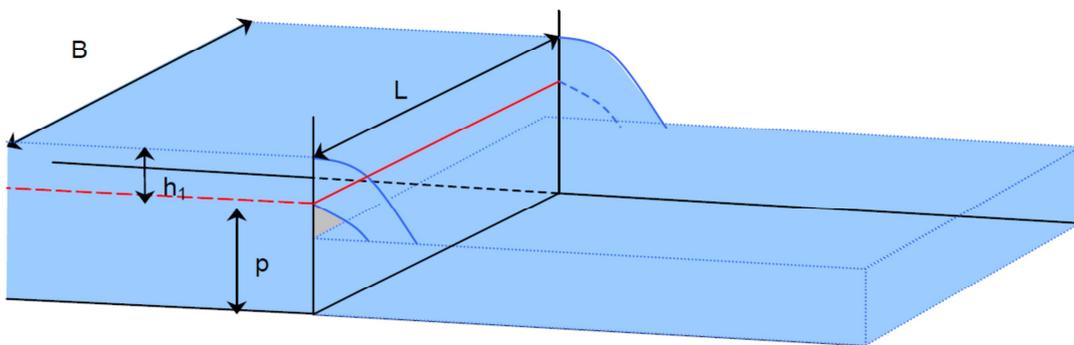


Figure 27 : Déversoir rectangulaire sans contraction latérale – Figure tirée du CETMEF (2005).

La loi de Kindsvater et Carter est recommandée par le CETMEF (2005).

$$Q = \mu C_v \sqrt{2g} B h_e^{3/2}$$

Dans cette équation, μ est le coefficient de débit pour lequel la formule suivante est recommandée.

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0,602 + 0,075 \frac{h_1}{p} \right)$$

Cette formule n'est valable que dans le domaine suivant :

- $h_1 > 0,03\text{m}$ (pour que la nappe soit non adhérente, c'est-à-dire que l'écoulement soit aéré)
- $p > 0,10\text{m}$
- $\frac{h_1}{p} < 2$ (pour éviter la présence de vagues en amont)

C_v est le coefficient de vitesse d'approche défini comme suit.

$$C_v = \left(\frac{H_1}{h_1} \right)^{3/2} \approx 1$$

Enfin, h_e est la hauteur d'eau effective définie ci-dessous, où la hauteur K_h , généralement de l'ordre de 1 mm, est donnée ci-dessous. K_h est une correction apportée pour tenir compte des effets de viscosité et de tension superficielle.

$$h_e = h_1 + K_h$$

Le tableau suivant donne quelques valeurs du coefficient de débit selon la hauteur amont h_1 et la hauteur de pelle p (hauteur de crête). La valeur 0,4 calculée grossièrement selon l'approche simplifiée est fautive (toujours en sous-estimation) de quelques pourcents jusqu'à 20% lorsque le rapport h_1/p vaut 2.

		p (m)					
		0,10	0,20	0,30	0,50	1,00	3,00
h_1 (m)	0,03	0,416	0,409	0,406	0,404	0,403	0,402
	0,05	0,426	0,414	0,410	0,406	0,404	0,402
	0,10	0,451	0,426	0,418	0,411	0,406	0,403
	0,20	0,501	0,451	0,435	0,421	0,411	0,405
	0,30		0,476	0,451	0,431	0,416	0,406
	0,50			0,485	0,451	0,426	0,410
	1,00				0,501	0,451	0,418

Quelques valeurs du coefficient de débit μ selon la formule de Kindsvater et Carter.

2. Déversoir rectangulaire à crête mince avec contraction latérale en dénoyé

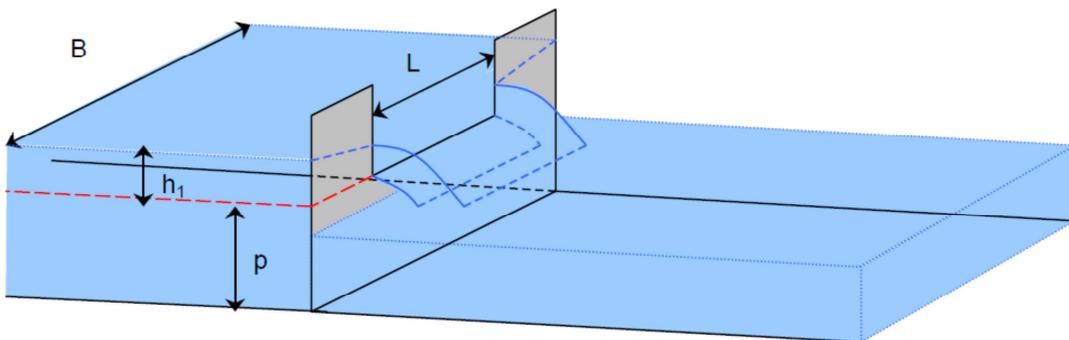


Figure 28 : Déversoir rectangulaire avec contraction latérale – Figure tirée du CETMEF (2005).

On parle de contraction latérale lorsque la largeur de déversoir L est plus petite que la largeur de la chambre en amont B , ainsi qu'illustré sur la figure précédente. La loi de Kindsvater et Carter est recommandée par le CETMEF (2005).

$$Q = \mu C_v \sqrt{2g} B_e h_e^{3/2} \quad \text{avec : } h_e = h_1 + 0,001 \quad \text{et} \quad C_v = \left(\frac{H_1}{h_1} \right)^{3/2} \approx 1$$

Dans cette loi, seuls les coefficients de débit μ et la largeur effective B_e sont différents de l'expression détaillée plus haut sans contraction latérale.

La largeur effective B_e se calcule selon l'expression suivante, où K_b est donné sur la figure suivante.

$$B_e = B_{\text{déversoir}} + K_b$$

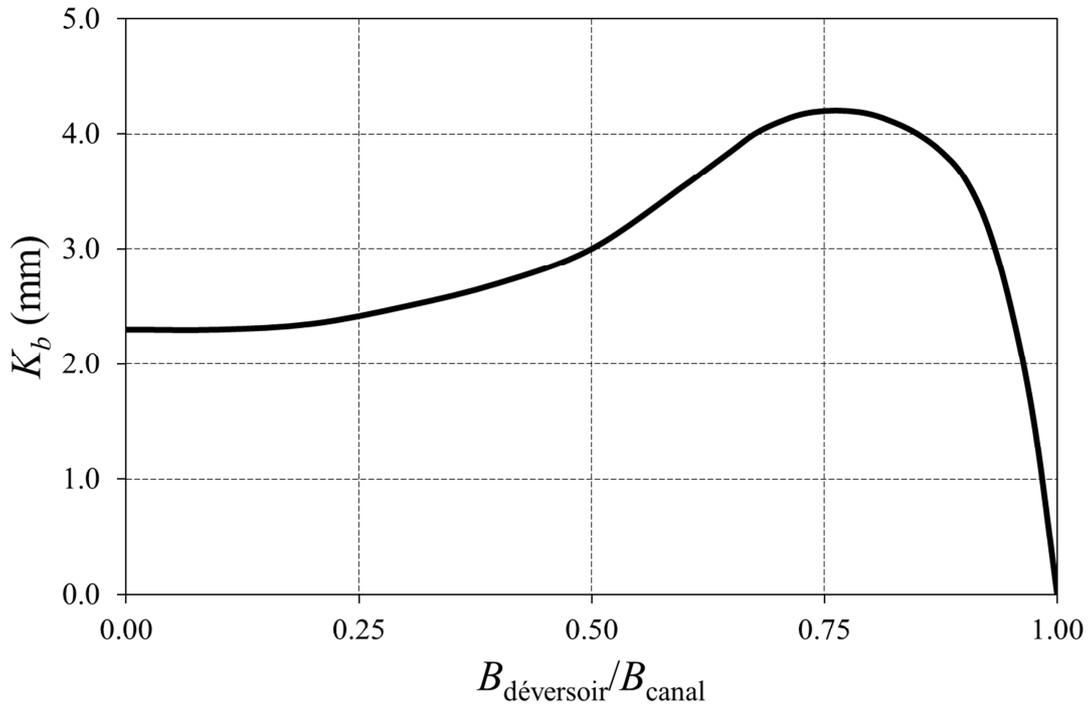


Figure 29 : Hauteur K_b en fonction du rapport de la largeur du déversoir sur la largeur du canal d'approche (CETMEF 2005).

Le coefficient de débit μ est quant à lui calculé selon l'équation suivante, où φ et ψ sont donnés par la figure suivante.

$$\mu = \frac{2}{3} \left(\varphi + \psi \frac{h_1}{p} \right)$$

Le domaine de validité de cette formulation est le suivant.

- $B_{\text{déversoir}} > 0,15 \text{ m}$
- $p > 0,10 \text{ m}$
- $h_1 > 0,03 \text{ m}$
- $B_{\text{canal}} - B_{\text{déversoir}} > 6h_1$
- $\frac{h_1}{p} < 2$

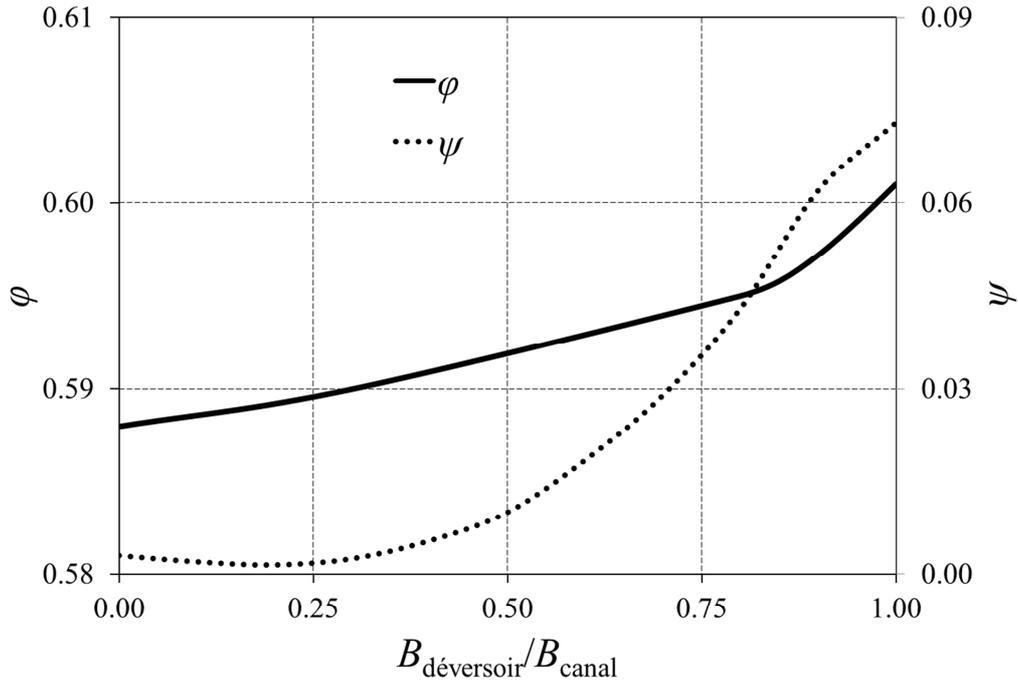


Figure 30 : Variation des coefficients φ et ψ en fonction du rapport de la largeur du déversoir sur la largeur du canal (CETMEF (2005)).

3. Seuil épais rectangulaire dénoyé sans contraction latérale

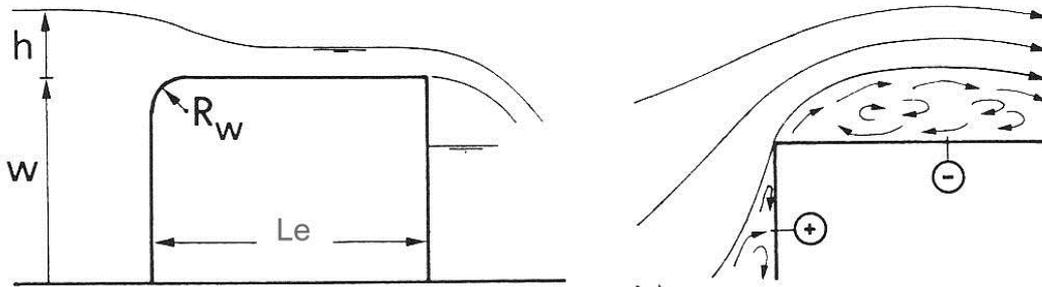


Figure 31 : Déversoir à seuil épais

Comparé à un déversoir à mince paroi, un paramètre supplémentaire relatif à la longueur de la crête (L_e) du déversoir doit être considéré.

$Q = C_d B \sqrt{2gh}^{3/2}$ $C_d = 0.326 \left[\frac{1 + \frac{9}{7} \left(\frac{h}{L_e} \right)^4}{1 + \left(\frac{h}{L_e} \right)^4} \right]$	$h > 50\text{mm}$ $b > 0,3\text{m}$ $w > 0,15\text{m}$
---	--

G. Position du point de mesure

La mesure de la lame déversante en amont du déversoir par rapport à la crête doit être effectuée à une distance d'environ 3 à 4 fois la lame déversante maximale que peut évacuer le déversoir.

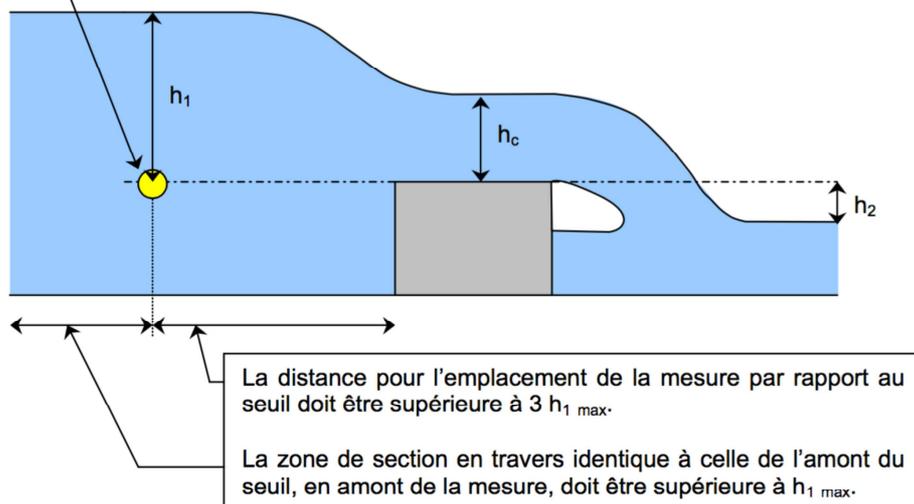
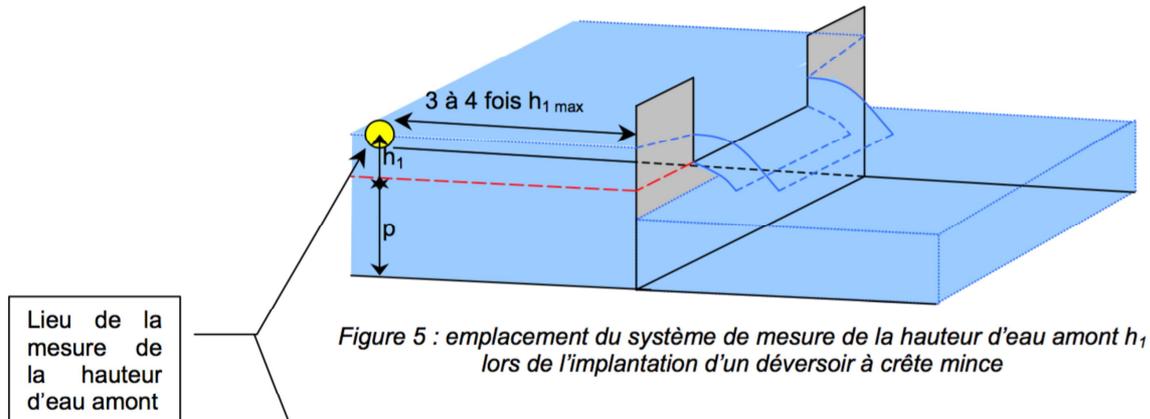


Figure 6 : précautions à prendre lors de l'implantation d'un déversoir à crête épaisse

Figure 32 : Position du point de mesure CETMEF 2005.

H. Exemple de diagnostic d'un déversoir frontal

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer par un exemple le diagnostic précédent. Afin de garantir la priorité aux lois hydrauliques les plus simples, il est nécessaire de :

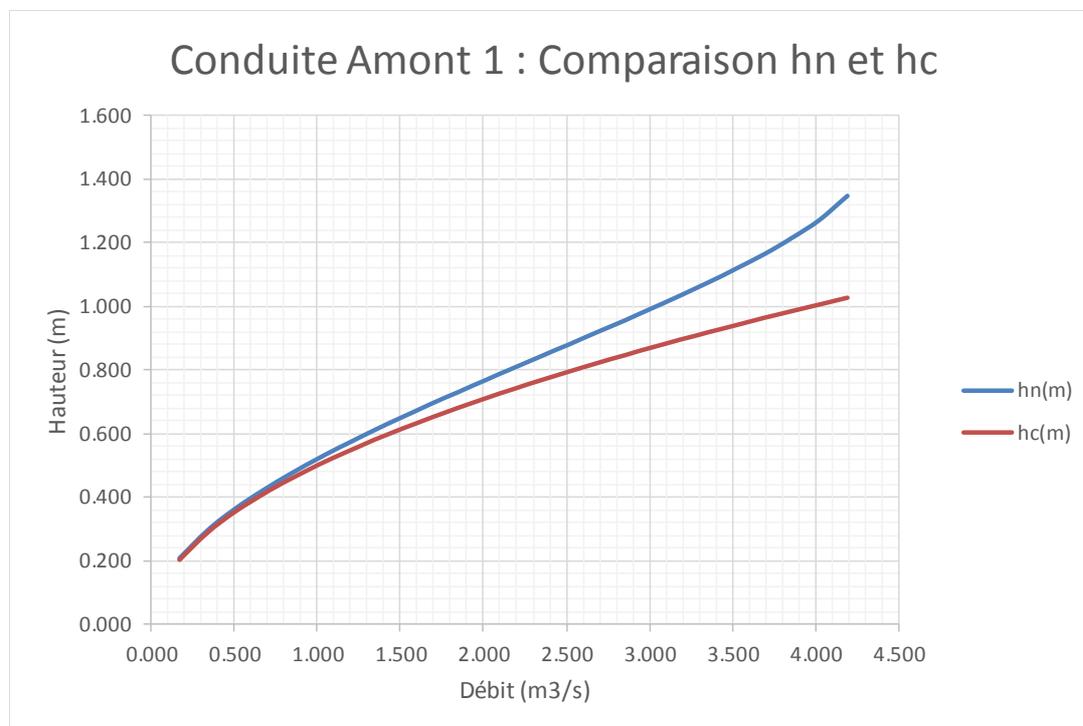
- **Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont,**
- **Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir,**
- **Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont,**
- **Vérifier l'ennoiement du déversoir par la conduite de décharge.**
- **Vérifier la vitesse de la conduite aval conservée.**

Partie de l'ouvrage	Détails
Amont	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite : DN 1600 DN1600 Pente : 0,3% 0,1% Pas de changement de direction en amont
Crête	<ul style="list-style-type: none"> Altitude de la crête (NGF) : 185,3m Fil de l'eau de la conduite amont entrée DO (NGF) : 184m Fil de l'eau de la conduite déversée DO (NGF) : 183m Longueur de crête : 2m Epaisseur de crête : 0,1m Pas de contraction latérale Pas d'ouvrage de contrôle
Aval conservé	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite : DN 500 Pente : 0,3%
Aval déversé	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite : DN 1600 Pente : 1,0%

a) Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont

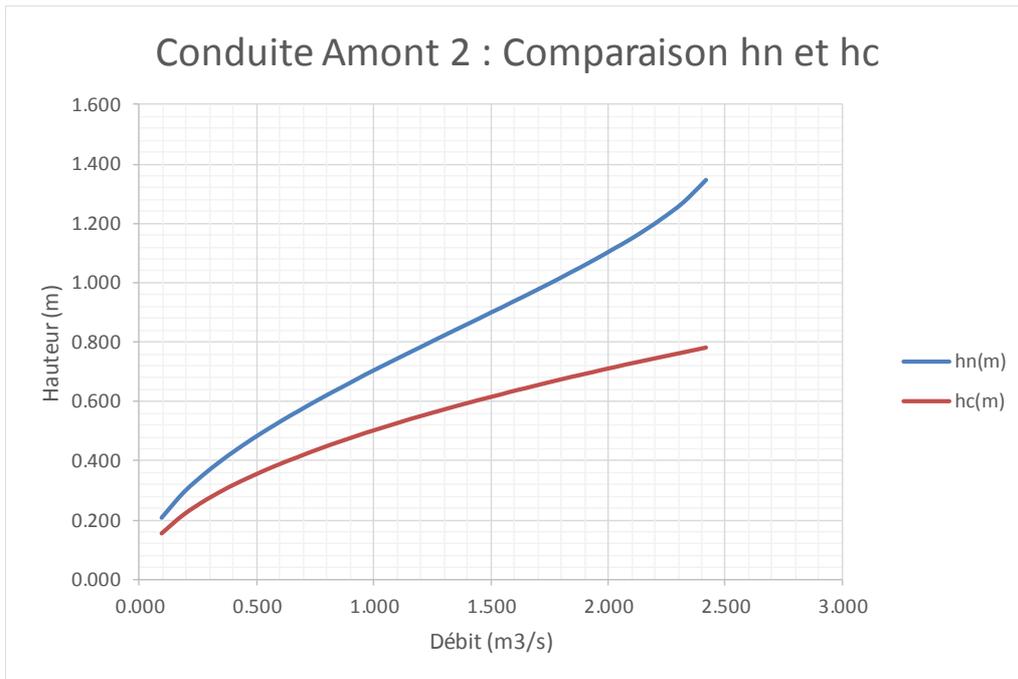
Le calcul consiste à vérifier que l'écoulement arrivant en amont du déversoir est fluvial.

Analyse de la conduite 1 : DN 1600 et pente 0.3%



Pour tous les débits : $h_n > h_c \Rightarrow$ canal à pente faible

Analyse de la conduite 2 : DN 1600 et pente 0.1%



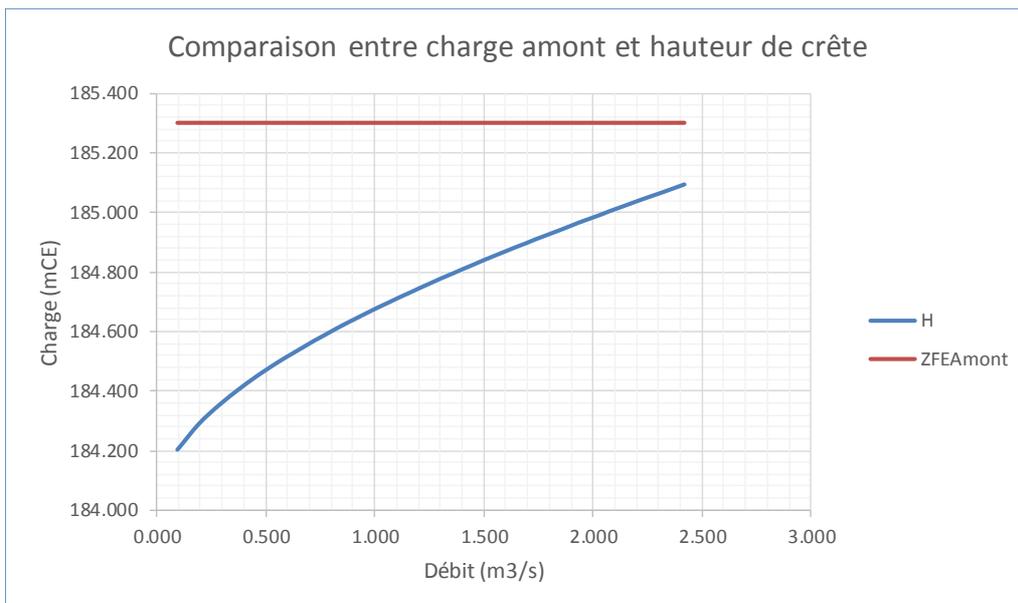
Pour tous les débits : $h_n > h_c \Rightarrow$ canal à pente faible

Conclusion :

- L'ensemble des conduites amont sont à pente faible \Rightarrow **l'écoulement fluvial est garanti à l'amont du déversoir.**

b) Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir

Le calcul consiste à vérifier que la charge hydraulique minimale provenant de **la conduite en amont du déversoir** est inférieure à la hauteur de crête du déversoir. Cette vérification n'est utile que si l'écoulement amont est fluvial. Dans le cas d'un écoulement amont torrentiel, le déversoir n'est pas propice à une instrumentation par des lois simples.



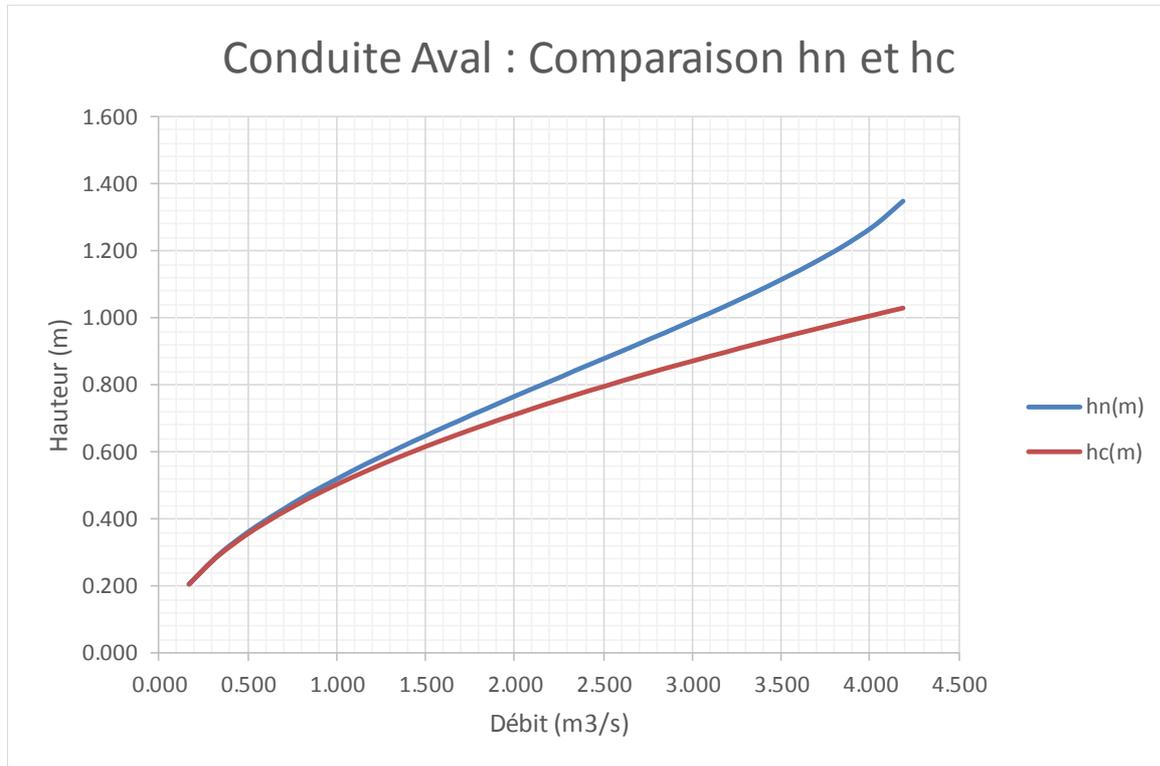
La charge (H) amont est inférieure à l'altitude de la crête \Rightarrow **l'écoulement est entièrement piloté par la crête ; il est donc fluvial à l'amont du déversoir.**

c) Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont

Les conduites amont sont rectilignes. (Il n'y a pas de présence de coude)

d) Vérifier l'envolement du déversoir par la conduite de décharge

Le calcul consiste à vérifier que la charge hydraulique provenant de l'**entonnement de la partie déversée** et de la **conduite en aval déversée du déversoir** est inférieure à la hauteur de crête du déversoir.



Pour tous les débits : $h_n < h_c \Rightarrow$ canal à pente forte

Dans ce cas, on pourra vérifier pour le débit déversé maximal amont que :

$$z_{\text{crête}} > z_{\text{FE déversée}} + h_{\text{dev}}$$

Le débit maximal amont est de $2,42 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à $h_{\text{dev}}=1,23 \text{ m}$. Avec $z_{\text{crête}}$ égale à $185,3 \text{ m}$ la condition est vérifiée.

e) Vérifier la vitesse de la conduite aval conservée

Le déversoir est à crête haute. Le débit de la conduite aval est estimé au débit à pleine section. La vitesse dans la conduite est de 0.3 m/s .

III. Le déversoir latéral

A. Type de déversoir et diagnostic géométrique

Le **déversoir latéral** est constitué d'une **crête rectiligne et faisant un angle avec l'écoulement de la conduite amont pouvant aller jusqu'à 20°**. Parmi les déversoirs à seuils latéraux, on peut encore établir une sous-catégorie selon :

- **L'angle entre l'écoulement de la conduite amont et la crête :**
 - Déversoir sans entonnement (angle nul),
 - Déversoir avec entonnement ($0 < \text{angle} \leq 20^\circ$)
- **Le nombre de crêtes de déversement :**
 - Déversoir à une crête déversante d'un seul côté,
 - Déversoir à deux crêtes déversantes de chaque côté,
- **La hauteur de la crête par rapport à la hauteur de la conduite aval conservée :**
 - Déversoir à crête haute : la hauteur de la crête est supérieure à la hauteur de la conduite aval conservée ; la mise en charge de cette conduite est nécessaire pour le déversement,
 - Déversoir à crête basse : la hauteur de la crête est inférieure à la hauteur de la conduite aval conservée,
- **L'épaisseur de la crête de déversement :**
 - Seuil à crête mince,
 - Seuil à crête épaisse.

Chaque particularité géométrique et hydraulique conditionne la loi hydraulique à appliquer.

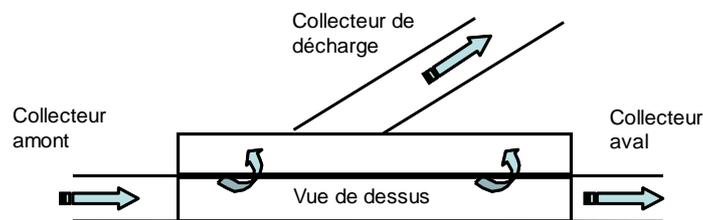


Figure 33 : Déversoir latéral à une crête déversante sans entonnement

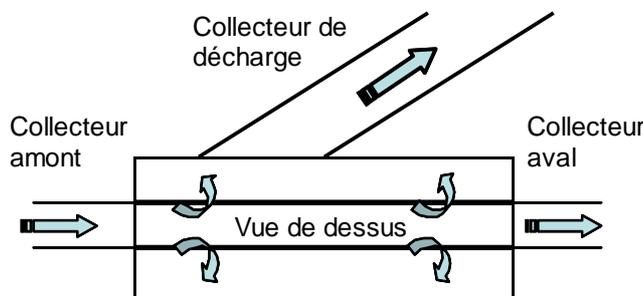


Figure 34 : Déversoir latéral à deux crêtes déversantes sans entonnement

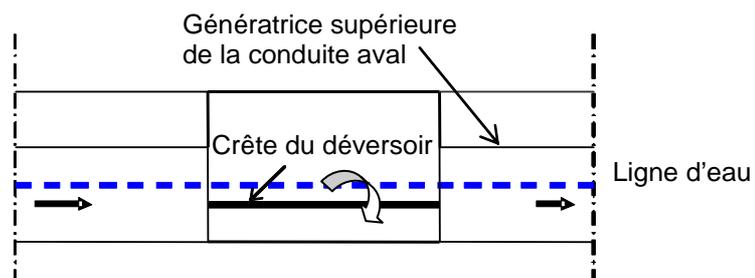


Figure 35 : Déversoir latéral à crête basse

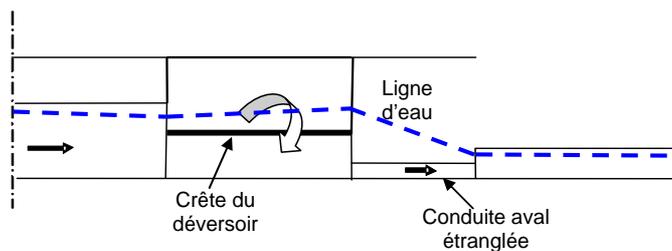


Figure 36 : Déversoir latéral à crête haute

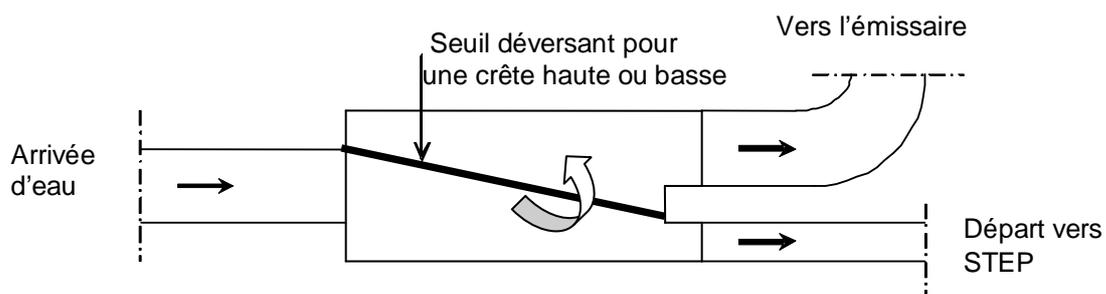


Figure 37 : Déversoir latéral avec entonnement

B. Données nécessaires pour le diagnostic

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des données nécessaires au diagnostic hydraulique du déversoir latéral.

Partie de l'ouvrage	Données	Détails
Amont	Profil en long sur environ 100m en amont	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite (DN, Ovoïde,...) Pentes Changement de direction Hauteurs en NGF
Crête	Données géométriques Ouvrage de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> Altitude de la crête (NGF) Fil de l'eau de la conduite amont en entrée du déversoir (NGF) Fil de l'eau de la conduite aval en sortie déversée du déversoir (NGF) Longueur de crête Largeur de crête Angle d'entonnement Type d'ouvrage de contrôle (vanne, ouverture de la vanne...)
Aval conservé	Profil en long sur environ 100m en aval conservé	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite (DN, Ovoïde,...) Pente Hauteurs en NGF
Aval déversé	Profil en long sur environ 50m en aval déversé	<ul style="list-style-type: none"> Type de conduite (DN, Ovoïde,...) Pente Hauteurs en NGF

C. Objectif du diagnostic hydraulique

Le fonctionnement hydraulique d'un déversoir latéral est très différent du fonctionnement des seuils. Afin de mettre en évidence la complexité du fonctionnement de ces ouvrages, la figure 38 représente un déversoir d'orage latéral à crête basse en cours de déversement.

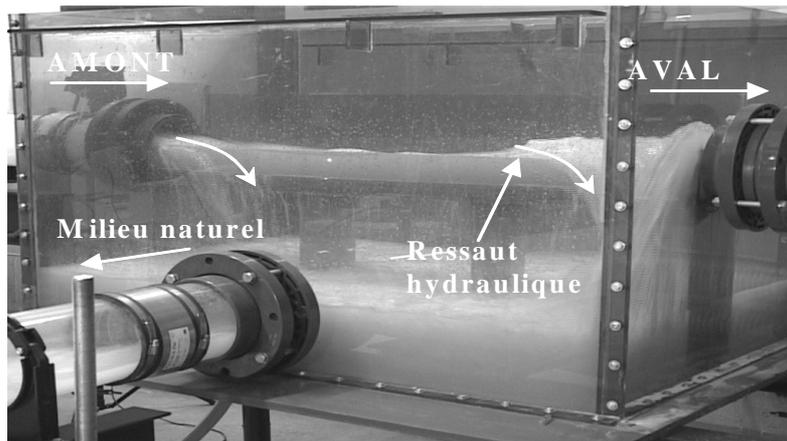


Figure 38 : Fonctionnement d'un déversoir d'orage latéral à seuil bas

On constate qu'il déverse un peu à l'amont et beaucoup à l'aval de la crête alors qu'en partie centrale, il n'y a pas de déversement. Aux deux tiers de la crête déversante, on a une élévation rapide de la ligne d'eau qui représente un ressaut hydraulique. L'étude en laboratoire a montré que, pour les déversoirs latéraux à crête basse, le ressaut hydraulique est souvent présent soit au droit de la crête déversante, soit dans les conduites amont ou aval de l'ouvrage.

La figure suivante représente un déversoir à crête haute. On constate une mise en charge de la conduite aval ainsi qu'une diminution de la section entre l'entrée et la sortie. L'effet de cet entonnement et de la paroi aval génèrent une élévation importante de la ligne d'eau à l'aval.

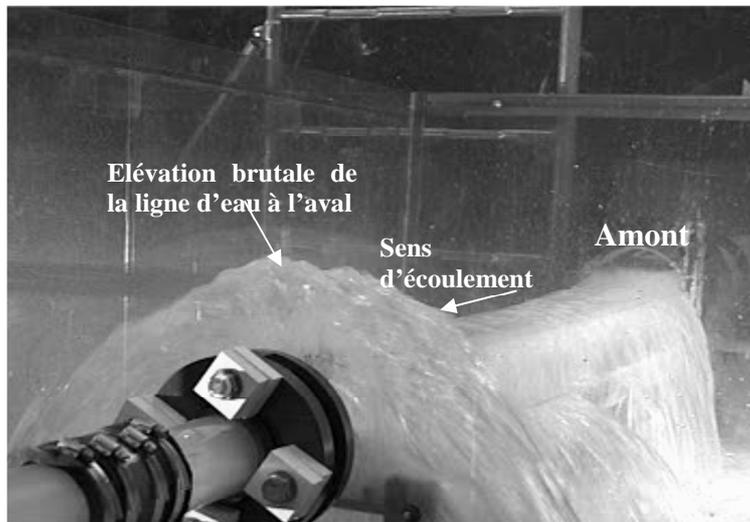


Figure 39 : Fonctionnement d'un déversoir latéral à seuil haut

Un déversoir latéral entièrement torrentiel est difficile à instrumenter car des ondulations de surface apparaissent et la vitesse de l'écoulement joue un rôle important dans le fonctionnement de l'ouvrage.

Un déversoir latéral ayant un ressaut hydraulique au niveau de la crête ne dispose pas actuellement de formule suffisamment fiable pour permettre son instrumentation. En effet, un ressaut incliné engendre une complexité importante et une instabilité de la surface aval ne permettant pas une mesure fiable de la lame déversante.

Dans l'objectif d'utiliser les outils hydrauliques tels que CalDO, il est nécessaire de garantir et de vérifier quelques contraintes hydrauliques :

- **Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont** du déversoir,

Le déversoir et la conduite amont doivent être pilotés d'un point de vue hydraulique par la crête du déversoir. La figure suivante montre la ligne d'eau et les régimes d'écoulement nécessaires. Si la conduite amont est à pente faible, on peut garantir un écoulement fluvial dans celle-ci.

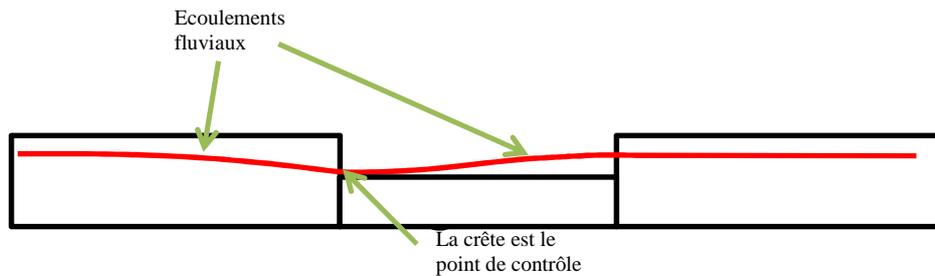


Figure 40 : Ecoulement fluvial dans la conduite amont

Dans le cas d'un écoulement amont arrivant en torrentiel, trois possibilités peuvent se présenter :

- *Un ressaut hydraulique dans la conduite amont.* Si le ressaut est proche de la chambre du déversoir, il peut générer des oscillations de la surface libre pouvant perturber la zone de mesure de la lame déversante. La position du ressaut est à localiser.

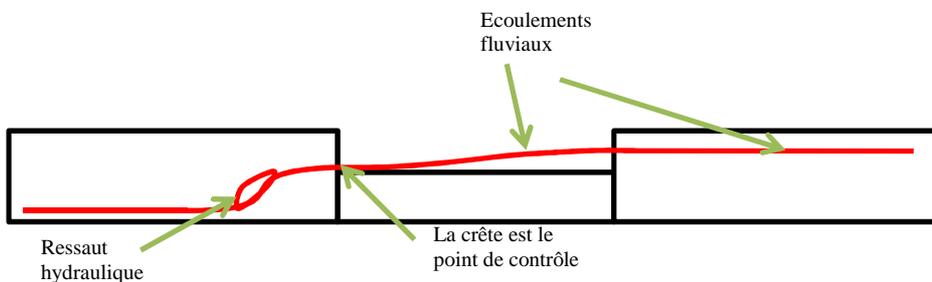


Figure 41 : Ressaut dans la conduite amont

- *Un ressaut dans la chambre du déversoir.* Dans ce cas, le ressaut génère des oscillations de la surface libre qui perturbent la zone de mesure de la lame déversante.

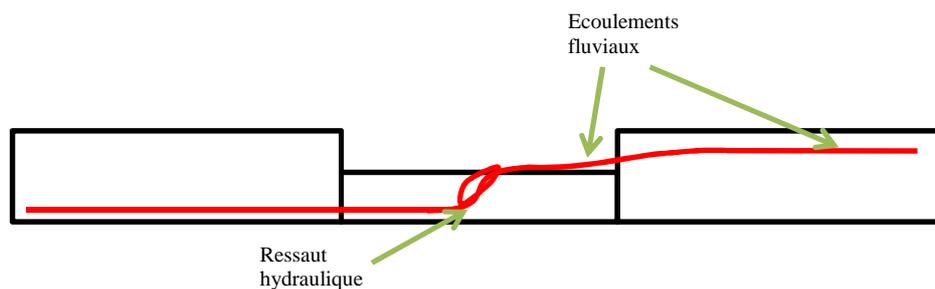


Figure 42 : Ressaut dans la chambre du déversoir

- *Un déversoir fonctionnant en torrentiel.* L'évaluation du débit déversé par la mesure de la hauteur d'eau n'est pas conseillée. Aucune formule actuelle n'est disponible pour ce type d'écoulement.
- **Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir.** Pour vérifier cette contrainte, il sera nécessaire d'avoir un écoulement fluvial dans la conduite amont afin de garantir une arrivée dans la chambre du déversoir en régime fluvial.

En fonction de la hauteur de crête du déversoir trois possibilités peuvent apparaître :

- *Une hauteur de crête importante.* Dans ce cas, l'écoulement fluvial amont pourra se maintenir dans le déversoir.
- *Une hauteur de crête faible.* Dans ce cas, l'écoulement fluvial amont passera par la hauteur critique en entrée de la chambre du déversoir. L'écoulement passera en torrentiel dans le déversoir et un ressaut hydraulique peut se former au niveau de la crête.
- **Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont.** L'existence d'un coude en amont du déversoir peut engendrer un champ de vitesse complexe dans le déversoir et une perturbation hydraulique importante. Ce comportement hydraulique ne permet pas de garantir les lois hydrauliques classiques.

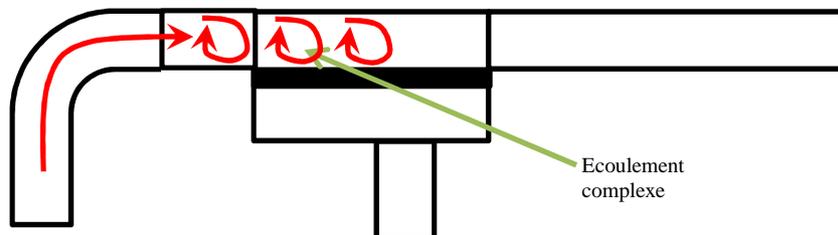


Figure 43 : Déversoir latéral avec coude en amont

- **Vérifier l'envoie du déversoir par la conduite de décharge.** L'évacuation de l'écoulement par la conduite de décharge peut engendrer une élévation de la ligne d'eau dans la chambre de déversement. Plusieurs possibilités peuvent apparaître :
 - La chambre de déversement n'influence pas l'écoulement au niveau de la crête de déversement. Dans ce cas le seuil est dénoyé.
 - La chambre de déversement influence l'écoulement au niveau de la crête de déversement. Dans ce cas le seuil est noyé.

D. Bilan du diagnostic

On rappelle que la finalité de ce guide est de permettre de faire un choix sur les moyens à mettre en œuvre en terme de calcul afin de proposer une instrumentation de l'ouvrage de déversement par la mesure de sa lame déversante.

Dans l'objectif d'utiliser les lois hydrauliques des déversoirs latéraux, d'un point de vue hydraulique, il est important de :

- **Garantir un écoulement fluvial dans la conduite amont** du déversoir pour rendre applicable l'ensemble des formules disponibles (utiliser la méthode : II.D.1)
- **Vérifier le passage de l'écoulement entre la conduite amont et la chambre du déversoir.** Il suffira de montrer que la hauteur de crête est supérieure à la hauteur critique à l'amont pour le débit maximal.
- **Vérifier un écoulement rectiligne provenant de l'amont** (utiliser II.D.3)
- **Vérifier l'ennoiement du déversoir par la conduite de décharge** (utiliser II.D.4)

Si ces conditions hydrauliques sont garanties, alors il est envisageable d'utiliser le logiciel CALDO afin de déterminer les différentes lignes d'eau en fonction du débit déversé. On rappelle que seuls les écoulements fluviaux sont pertinents dans le cadre d'une instrumentation.

Dans le cas où l'une des conditions hydrauliques précédentes n'est pas garantie, il est conseillé de réaliser une analyse hydraulique approfondie de l'ouvrage afin de mieux comprendre les contraintes hydrauliques non vérifiées. En fonction du diagnostic, il peut être envisagé :

- Soit une modification géométrique simple de l'ouvrage afin de permettre une utilisation des relations hydrauliques classiques ou une modélisation 3D simplifiée.
- Soit une modélisation 3D de l'ouvrage si le diagnostic hydraulique permet de garantir l'instrumentation mais avec une loi fournie par la modélisation 3D,
- Soit un autre moyen d'instrumentation qu'une mesure de la lame déversante,
- Soit une reconstruction complète de l'ouvrage.

IV. Cas des autres déversoirs

A. Introduction

Cette partie s'intéresse au cas des déversoirs géométriquement complexes. Elle a pour objectifs de donner des éléments permettant de répondre aux deux questions suivantes :

1. Le déversoir est-il instrumentable avec une mesure de niveau d'eau ?
2. Si oui, quel modèle utiliser pour déterminer la relation hauteur / débit ?

Des exemples de déversoirs géométriquement complexes sont donnés sur la Figure 44 et la Figure 45. Un schéma général est donné sur la Figure 46. La Figure 44 illustre ainsi un déversoir présentant deux entrées arrivant, pour l'une frontalement et pour l'autre latéralement, sur une crête déversante d'épaisseur non constante. La Figure 45 correspond quant à elle à un déversoir présentant une crête de déversement courbe. Quant au schéma de la Figure 46, il illustre un déversoir présentant trois entrées, aucune des trois entrées n'étant parfaitement frontale ou latérale par rapport à la crête déversante.



Figure 44. Déversoir DO94 de l'Eurométropole de Strasbourg (photographie : Eurométropole de Strasbourg).



Figure 45. Seuil courbe en amont du bassin de Sucy en Brie (photographies : Conseil Départemental du Val de Marne).

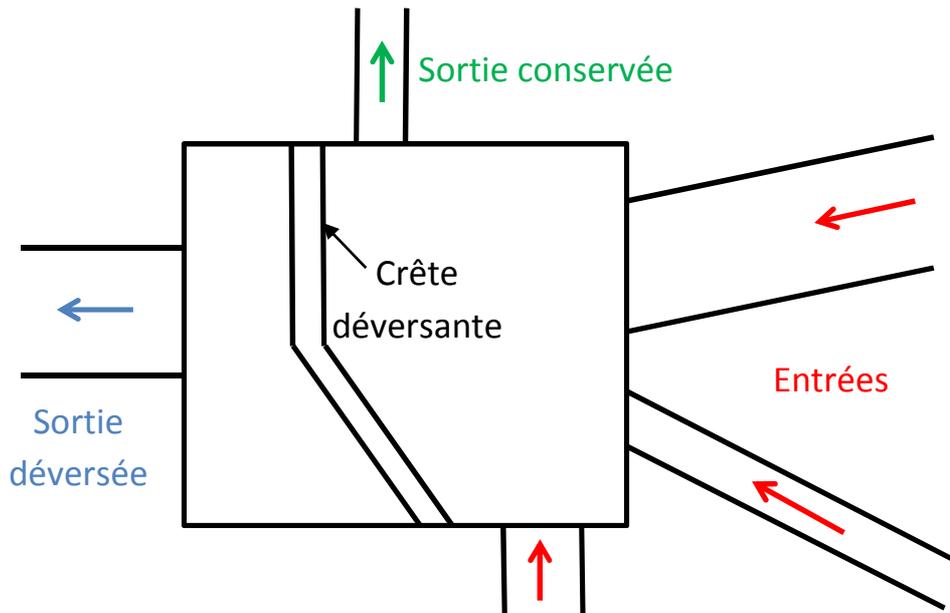


Figure 46. Schéma d'un déversoir géométriquement complexe (vue de dessus).

B. Le déversoir géométriquement complexe est-il instrumentable à partir d'une mesure de niveau d'eau ?

Complexité géométrique ne signifie pas nécessairement complexité hydraulique (de la même façon que simplicité géométrique ne signifie pas simplicité hydraulique). L'objectif est ici de déterminer de façon simple si le déversoir est instrumentable à partir de mesure de niveau d'eau. Dans le cas où il serait instrumentable par cette méthode, la partie suivante fournit un moyen simple pour déterminer l'outil nécessaire pour l'établissement de la relation hauteur / débit.

Concrètement, cela revient à poser les deux questions suivantes :

1. Un ressaut hydraulique est-il possible dans le déversoir d'orage ? Auquel cas son instrumentation en hauteur d'eau est compromise compte tenu des perturbations de la surface libre provoquées par ce phénomène (voir la Figure 47).
2. La hauteur de lame déversante est-elle suffisamment importante pour que la mesure soit précise ?



Figure 47. Exemple de ressaut hydraulique dans un canal de laboratoire.

1. Risque de ressaut hydraulique

Le risque de ressaut hydraulique peut être diagnostiqué à partir de l'organigramme suivant. Il consiste à prendre en considération chacune des conduites d'entrée et à déterminer si la charge minimale rencontrée dans cette canalisation est supérieure ou inférieure à la charge correspondant à la crête déversante. Dans le cas où la charge minimale de l'écoulement est supérieure à la charge correspondant à la crête déversante, l'écoulement a de l'énergie à dissiper et il y a un risque de ressaut hydraulique. Dans le cas où la charge minimale de l'écoulement est inférieure à la charge correspondant à la crête déversante, il n'y a aucun risque de ressaut hydraulique.

La démarche proposée vise à garantir l'absence de ressaut hydraulique afin de fiabiliser la mesure. Afin d'éviter un calcul trop complexe, des approximations sécuritaires ont été réalisées. En d'autres termes, si les conditions sont remplies, on peut garantir qu'aucun ressaut hydraulique n'aura lieu dans l'ouvrage. Si les conditions ne sont pas remplies, il y a un risque de ressaut hydraulique (une étude plus fine permettrait de le déterminer avec certitude).



Figure 48. Organigramme permettant de diagnostiquer le risque de ressaut hydraulique dans le déversoir d'orage.

Les différentes étapes de cet organigramme sont les suivantes :

1. Pour chaque entrée, il faut évaluer le débit qui va générer la vitesse la plus importante. C'est en effet ce débit qui va le plus « pousser » le ressaut hydraulique vers l'aval.
2. On peut alors déterminer la nature de la pente (faible ou forte) à ce débit. Pour cela, le logiciel HSL librement téléchargeable sur le site hydraulique-des-reseaux.engees.eu peut être utilisé.
3. Cas d'une pente forte :
 - a. Si la pente est forte, l'écoulement va avoir tendance à arriver au niveau du déversoir d'orage en régime torrentiel.
 - b. Un écoulement à pente forte atteignant rapidement la hauteur normale, on peut considérer que la hauteur est égale à la hauteur normale h_n à l'entrée du déversoir.
 - c. On calcule alors la charge correspondant à cette hauteur. On peut prendre comme référence de la charge le pied de la crête.

- d. Cas où la charge est inférieure à la hauteur de crête : dans ce cas, aucun ressaut hydraulique n'aura lieu dans l'ouvrage.
 - e. Cas où la charge est supérieure à la hauteur de crête : dans ce cas, il y a un risque qu'un ressaut hydraulique prenne place dans l'ouvrage et rende son instrumentation en hauteur impossible.
4. Cas d'une pente faible :
- a. Si la pente est forte, l'écoulement va avoir tendance à arriver au niveau du déversoir d'orage en régime fluvial.
 - b. Compte tenu de l'élargissement au niveau de l'arrivée dans le déversoir, l'écoulement va tendre vers la hauteur critique. On peut considérer que la hauteur est égale à la hauteur critique h_c à l'entrée du déversoir.
 - c. On calcule alors la charge correspondant à cette hauteur. On peut prendre comme référence de la charge le pied de la crête.
 - d. Cas où la charge est inférieure à la hauteur de crête : dans ce cas, aucun ressaut hydraulique n'aura lieu dans l'ouvrage.
 - e. Cas où la charge est supérieure à la hauteur de crête : dans ce cas, il y a un risque qu'un ressaut hydraulique prenne place dans l'ouvrage et rende son instrumentation en hauteur impossible.

Remarque : vitesse maximale ne correspond pas forcément tout à fait avec débit maximum. La différence étant toutefois modérée, on pourra considérer que la vitesse maximale correspond au débit maximum sans commettre une erreur très importante. On peut par ailleurs considérer que le débit maximum correspond à peu près au débit à pleine section (sauf si mise en charge de l'amont).

Exemple 1 : on cherche à instrumenter un déversoir dont la longueur de crête est de 2.5 m et dont la hauteur de crête est de 0.70 m par rapport au radier de la conduite d'amenée. Il y a une seule conduite d'entrée dont le diamètre est égal à 800 mm ; sa pente est égale à 0.2%. Le maître d'ouvrage évalue le débit « moyen » de déversement à 0.08 m³/s ; le débit maximum n'est pas connu.

En utilisant le logiciel HSL et en considérant une rugosité de Strickler de 70 m^{1/3}/s, on peut évaluer le débit maximum à environ à 0.54 m³/s (débit à pleine section). Remarque : des débits supérieurs sont possibles si l'amont est mis en charge mais ce cas de figure sort du cadre de l'autosurveillance.

Pour un tel débit, la hauteur normale est égale à 0,800 m (pleine section) ; la hauteur critique à 0,44 m. La hauteur normale étant supérieure à la hauteur critique, la pente est donc faible. L'écoulement va donc tendre vers la hauteur critique à son arrivée dans le déversoir.

Pour une telle hauteur, le logiciel HSL permet d'évaluer la section de passage à 0,28 m². La vitesse de passage est donc de 1.90 m/s. La charge s'obtient alors en ajoutant $V^2/2g$ à h , ce qui aboutit à une valeur de 0.62 m.

La hauteur de crête (0,70 m) est ainsi supérieure à la charge à l'arrivée de la conduite dans le déversoir.

En conclusion, il n'y a aucun risque de ressaut hydraulique dans cet ouvrage.

Exemple 2 : on veut instrumenter un déversoir présentant deux conduites d'entrée (DN400 à 0,35% et DN600 à 0,45%), une crête déversante de longueur 1,30 m, de hauteur 4,60 m par rapport au radier de la conduite DN400 et 5,20 m par rapport au radier de la conduite DN600. Le débit déversé moyen est de l'ordre de 0,1 m³/s. Les débits maxima du DN400 et du DN600 valent respectivement environ 0,11 et 0,37 m³/s.

En utilisant le logiciel HSL, on se rend compte que la conduite DN400 est à pente faible avec une hauteur critique égale à 0,24 m. Le DN600 est également à pente faible avec une hauteur critique égale à 0,40 m.

Le calcul des vitesses correspondantes puis des charges aboutit aux valeurs suivantes : vitesse de 1,42 m/s et charge de 0,35 m pour le DN400, 1,87 m/s et 0,59 m pour le DN600.

Les deux charges étant (très largement) inférieures à la hauteur de crête, il n'y a aucun risque de ressaut hydraulique dans ce déversoir.

Exemple 3 : un déversoir de hauteur de crête 0.50 m est alimenté par une conduite d'entrée de diamètre 800 mm et de pente 0.9%. Le débit maximum est évalué à 1.0 m³/s.

En utilisant HSL, on peut montrer que la conduite d'entrée est à pente forte. La hauteur à considérer à l'entrée est donc la hauteur normale, soit 0.58 m. Pour une telle hauteur, la surface de passage est de 0.39 m², soit une vitesse de 2.56 m/s. La charge peut alors être évaluée à 0.92 m.

Cette charge étant (largement) supérieure à la hauteur de crête, il y a un risque de ressaut hydraulique dans ce déversoir. Il n'est donc pas instrumentable en hauteur d'eau.

2. Précision de la mesure

La seconde vérification à effectuer, une fois garanti qu'aucun ressaut hydraulique ne prendra place dans l'ouvrage, est de vérifier que la lame déversante sera suffisamment importante pour qu'une mesure de précision soit possible. En effet, si la longueur de crête est très grande par rapport au débit déversé, la lame déversante pourra être extrêmement faible (de l'ordre de 1 à 2 cm), auquel cas la répercussion de l'incertitude sur la hauteur se traduira par une très forte incertitude sur le débit déversé.

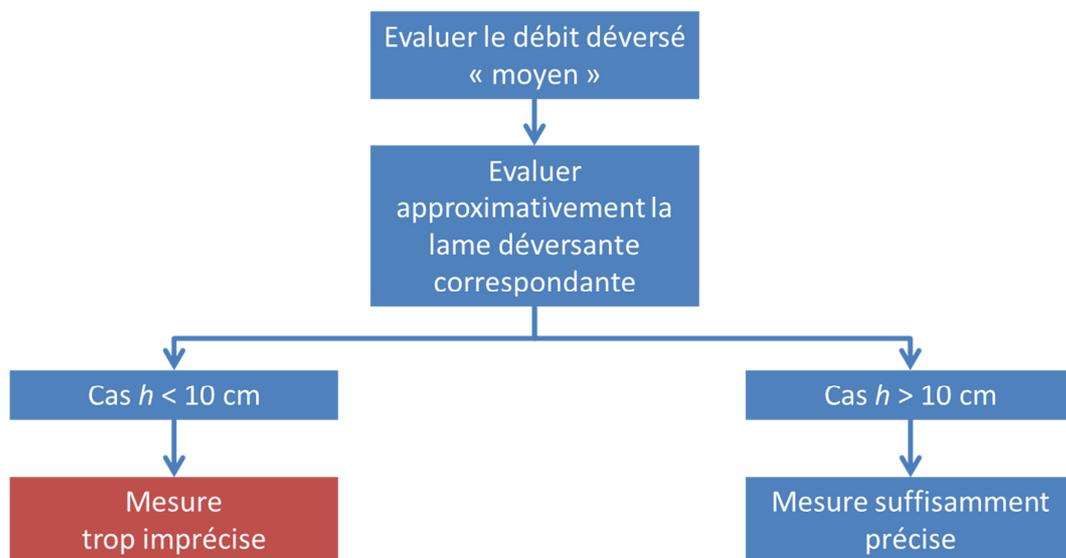


Figure 49. Organigramme permettant de déterminer si la mesure du débit déversé est suffisamment précise.

1. La première étape consiste à évaluer le débit déversé « moyen ». Par « moyen », on entend le débit déversé qu'une pluie classique va générer.
2. La lame déversante correspondant à ce débit peut alors être évaluée en utilisant la loi hauteur / débit suivante. Cette loi n'est strictement valable que pour un seuil frontal mais elle constitue une approximation suffisante pour donner un ordre de grandeur de la lame déversante.

$$h \approx \frac{Q^{2/3}}{\frac{2}{3} g^{1/3} L^{2/3}}$$

3. Cas où la lame déversante est inférieure à 10 cm : on considère dans ce cas que la lame déversante est trop faible pour pouvoir effectuer une mesure de qualité. Le déversoir n'est pas instrumentable en l'état.
4. Cas où la lame déversante est supérieure à 10 cm : on considère dans ce cas que la lame déversante est suffisante pour pouvoir effectuer une mesure de qualité. Le déversoir est instrumentable sans modification.

Remarque : la valeur seuil de 10 cm est un choix issu du graphique suivant obtenu en considérant l'incertitude de mesure de la lame déversante et en la propageant dans la relation hauteur / débit. L'incertitude de mesure provient de l'incertitude sur la mesure du niveau d'eau (4 mm selon la norme ISO 6416) et de l'incertitude sur le zéro (10 mm selon cette même norme), ce qui aboutit à une incertitude de l'ordre de 11 mm sur la hauteur d'eau. Si la lame déversante est supérieure à 10 cm pour un débit moyen, cela signifie que le débit sera connu à une précision meilleure que 20%.

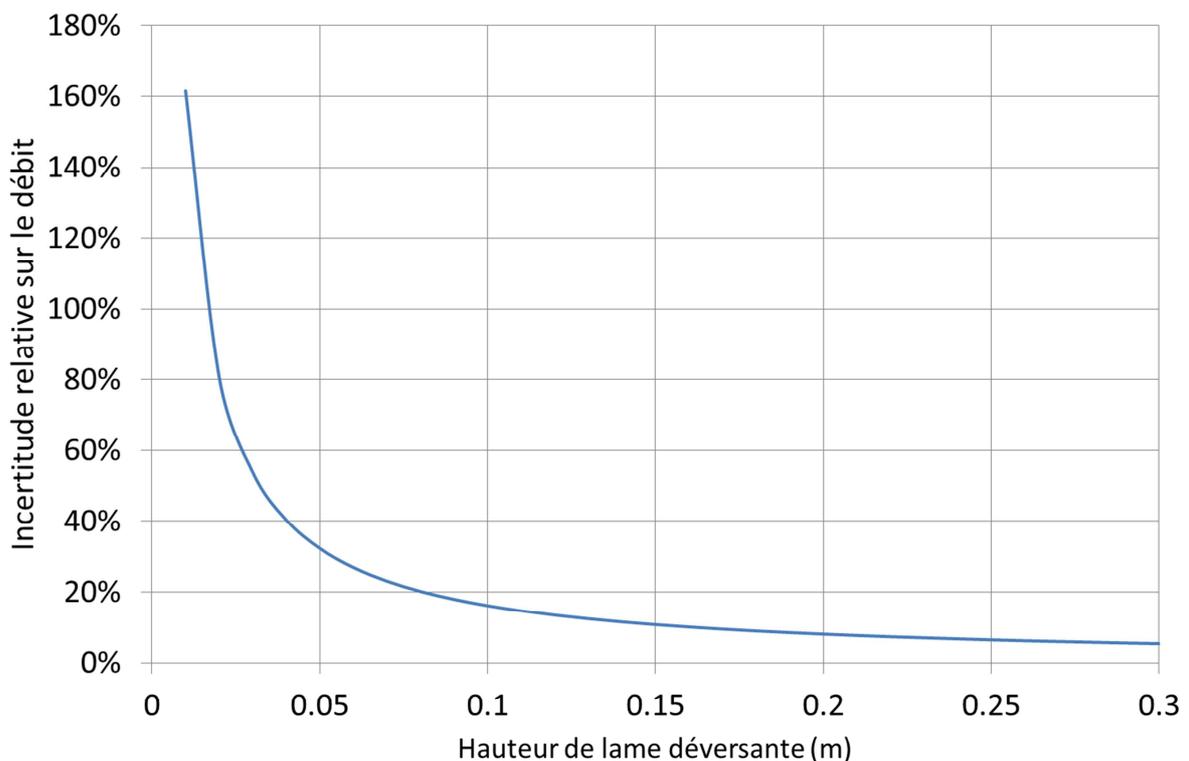


Figure 50. Ordre de grandeur de l'incertitude de mesure en fonction de la hauteur de lame déversante.

Exemple 1 (suite) :

Reprenons l'exemple débuté plus haut. Le débit moyen est égal à $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. En utilisant la formule précédente avec une longueur de crête de 2.5 m, on peut approximativement évaluer la lame déversante à 7 cm. Cette valeur étant inférieure à 10 cm, on peut conclure que la mesure, si elle est possible, ne sera pas très précise.

Une réduction de la longueur de déversement (en créant une fenêtre préférentielle de déversement) peut être envisagée pour rendre la mesure plus précise.

Exemple 2 (suite) :

Dans cet exemple, la longueur de crête est de 1.30 m et le débit moyen vaut $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Le calcul approximatif de la lame déversante aboutit ainsi à environ 13 cm. La précision sera donc suffisante pour pouvoir instrumenter ce déversoir en hauteur d'eau.

C. Détermination de la relation hauteur / débit

Une fois vérifié qu'aucun ressaut hydraulique ne risque de prendre place dans le déversoir et que la lame déversante est suffisamment grande pour permettre une mesure précise, il reste à déterminer la relation hauteur / débit en elle-même. Plusieurs outils sont disponibles pour cela, des outils les plus simples (lois hauteur / débit explicites telles que la loi d'un seuil frontal rappelée plus haut) aux outils les plus complexes (modèle 3D). L'objectif de cette partie est de déterminer l'outil adapté pour cette détermination en fonction du déversoir.

Pour cela, l'organigramme suivant peut être utilisé.

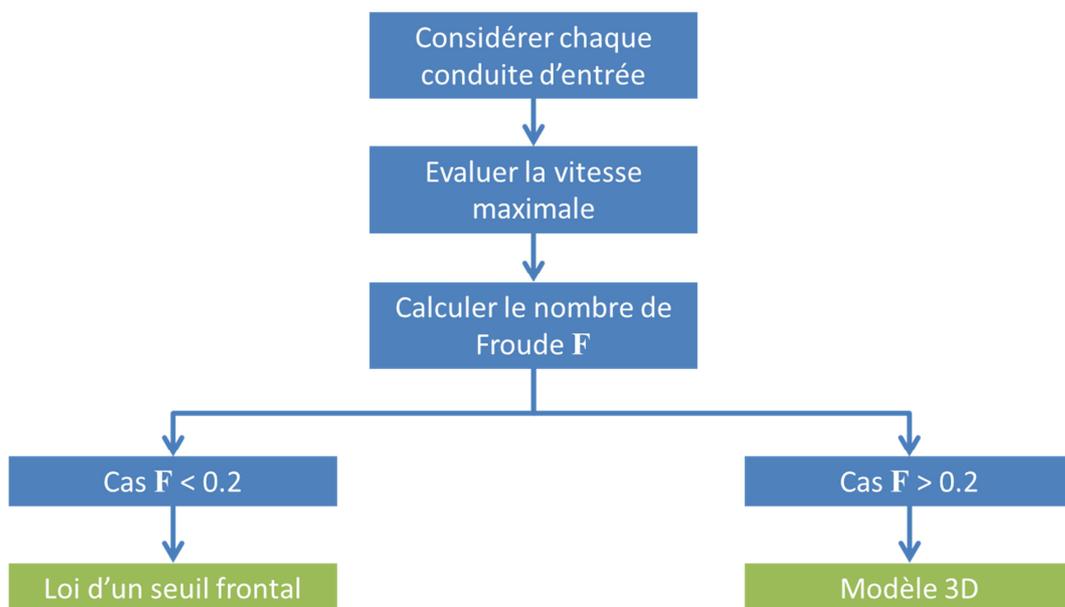


Figure 51. Organigramme permettant de déterminer l'outil pour établir la relation hauteur / débit.

1. Pour chaque conduite d'entrée, il faut évaluer la vitesse maximale.
2. Une fois cette vitesse établie, le nombre de Froude suivant peut être déterminé :

$$F = \frac{U_{\max}}{\sqrt{gp}}$$

Où p est la hauteur de crête par rapport au radier de la canalisation considérée.

3. Cas où le nombre de Froude F est inférieur à 0.2 : une loi de seuil frontal (par exemple la loi Kindsvater & Carter) peut être utilisée (CETMEF 2005).
4. Cas où le nombre de Froude F est supérieur à 0.2 : un modèle 3D est nécessaire pour établir la relation hauteur / débit avec précision.

Remarque 1 : la valeur seuil de 0.2 pour le nombre de Froude correspond à la condition d'application de la loi de Kindsvater & Carter $h/p < 0.2$.

Remarque 2 : cette valeur de 0.2 est très restrictive. Rares sont les déversoirs pour lesquels cette condition sera vérifiée. On peut citer le cas des déversoirs dont la conduite d'entrée est située très bas par rapport à la crête déversante.

Exemple 1 (suite) :

Continuons l'exemple 1 dans le cas où la fenêtre de déversement a été réduite de façon à rendre la mesure précise (par exemple en créant une fenêtre préférentielle de 50 cm de large). La hauteur de crête est égale à 0.70 m et la vitesse maximale a été évaluée à 1.90 m/s. Le calcul du nombre de Froude aboutit à une valeur de 0.73. Cette valeur étant supérieure à la valeur seuil de 0.2, la loi de Kindsvater & Carter n'est pas applicable ; un modèle 3D est nécessaire pour déterminer la relation hauteur / débit avec précision.

Exemple 2 (suite) :

Dans cet exemple, deux calculs doivent être effectués pour chacune des deux conduites d'entrée.

Compte tenu du calcul précédent, on peut garantir qu'aucun ressaut n'aura lieu dans l'ouvrage. La hauteur de crête étant supérieure aux diamètres des deux canalisations, on peut par ailleurs garantir que les deux canalisations vont fonctionner en charge. Les vitesses maximales peuvent donc être calculées en considérant les débits maxima (0.11 et 0.37 m³/s) et les sections pleines (0.13 et 0.28 m²).

Ce calcul aboutit à des vitesses de respectivement 0.89 et 1.32 m/s, soit des nombres de Froude de respectivement 0.13 et 0.19. Les deux conditions sont donc respectées ($F < 0.2$).

En conclusion, une loi de seuil frontal est applicable pour ce déversoir (par exemple Kindsvater & Carter). Aucun modèle 3D n'est nécessaire.

V. Références

CETMEF (2005). *Notice sur les seuils et les déversoirs – Synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et des déversoirs*. Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, Département Environnement Littoral et Cours d'Eau, Division Hydraulique et Sédimentologie Fluviales.

ISO (2004). *Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)*. Association Internationale de Normalisation, ISO 6416:2004.