

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Content

S'appuyant sur de nombreux manuels, les canaux d'essai de GUNT transmettent les principes de base de l'écoulement dans des canaux en se basant sur l'exemple d'un canal d'essai à section rectangulaire.

La première partie de ce chapitre présente les principes de base de l'écoulement dans des canaux. En parallèle, nous vous montrons comment mettre en pratique de manière expérimentale des thématiques et phénomènes particuliers. Ces représentations sont valables en principe pour tous les canaux d'essai GUNT et leurs accessoires.

Principes de base de l'écoulement dans des canaux rayon hydraulique périmètre mouillé profils de canaux typiques	072
Écoulement uniforme dans un canal rectangulaire formules de débit	074
Écoulement stationnaire équation de continuité équation de Bernoulli charge spécifique	075
Écoulement non uniforme dans un canal rectangulaire changement d'écoulement courbe de charge spécifique courbe de force spécifique	076
Détermination de la perte de charge lors d'un ressaut	078
Nombre de Froude et écoulement critique perturbation momentanée et perturbation permanente ressaut avec différents nombres de Froude	079 081
Montée et abaissement du niveau dans un canal ouvert	082
Dissipation d'énergie bassin d'amortissement	084
Ouvrages de contrôle écoulement par des déversoirs ■ condition de nappe au niveau du déversoir ■ écoulement par des déversoirs fixes ■ types de chutes ■ calcul du débit selon Poleni déversoirs à crête arrondie déversoirs à paroi mince déversoirs à seuil épais déversoir à siphon vannes	086 086 087 088 088 089 090 091 092 093
Passage	094
Pertes locales dans des canaux ouverts piles	095
Procédés de mesure du débit canal jaugeur déversoirs de mesure	096
Écoulement non stationnaire: vibrations induites par l'écoulement pilots vibrants	098
Transport des sédiments transport par charriage	099
Écoulement non stationnaire: vagues	100



Les eaux courantes naturelles représentent des "écoulements dans des canaux ouverts". Depuis des siècles, on y entreprend des constructions: canaux d'irrigation, protection contre les inondations et aménagement des rivières pour la navigation et l'exploitation d'énergie.



On peut notamment citer les systèmes de distribution d'eau datant de l'Antiquité (aqueducs) ou les canaux d'irrigation agricoles qui s'étendent sur de très grandes distances: les "Levadas" au Portugal (en bas).

Symboles de grandeur fréquemment utilisés

E	charge spécifique
ΔE	perte de charge
h	profondeur de l'écoulement
h_c	profondeur critique
h_d	profondeur d'écoulement de l'eau en aval ("downstream")
h_o	hauteur ("weir head")
h_u	profondeur de l'eau en amont ("upstream")
J	pente de la ligne de charge
Q	débit
v	vitesse d'écoulement
W	hauteur du déversoir



Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

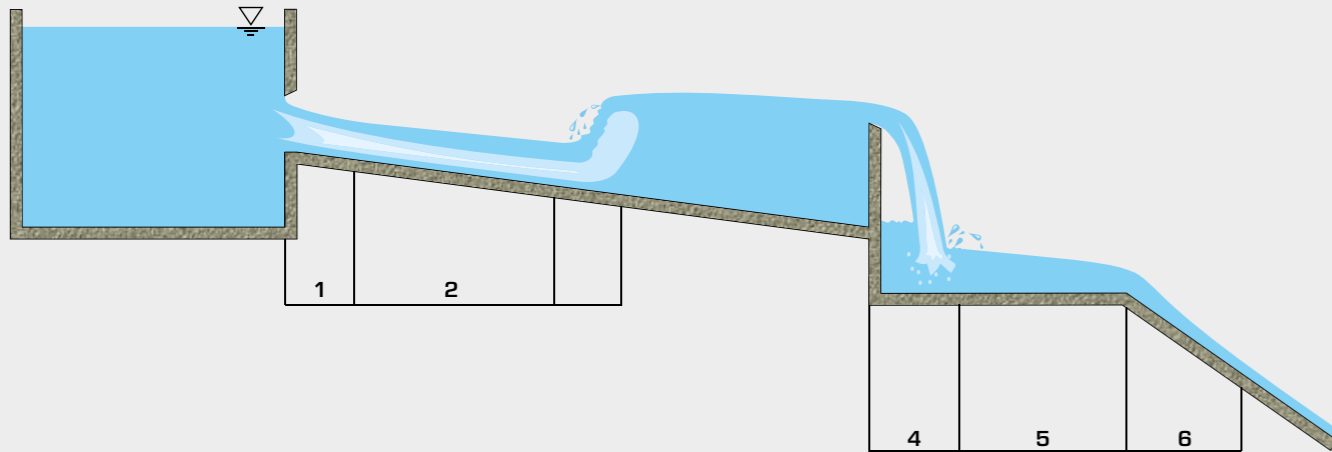
Principes de base de l'écoulement dans des canaux

Les écoulements dans des canaux sont très répandus. On peut citer notamment les rivières ou les canaux, les tranchées de drainage, les rigoles, les attractions aquatiques des parcs de loisirs ou la canalisation. La force motrice de ces écoulements généralement turbulents est la gravitation. Ce qui caractérise les écoulements dans des canaux est leur surface libre. Comparé aux écoulements tubulaires, les écoulements dans des canaux disposent, de par leur surface libre, d'un degré de liberté supérieur.

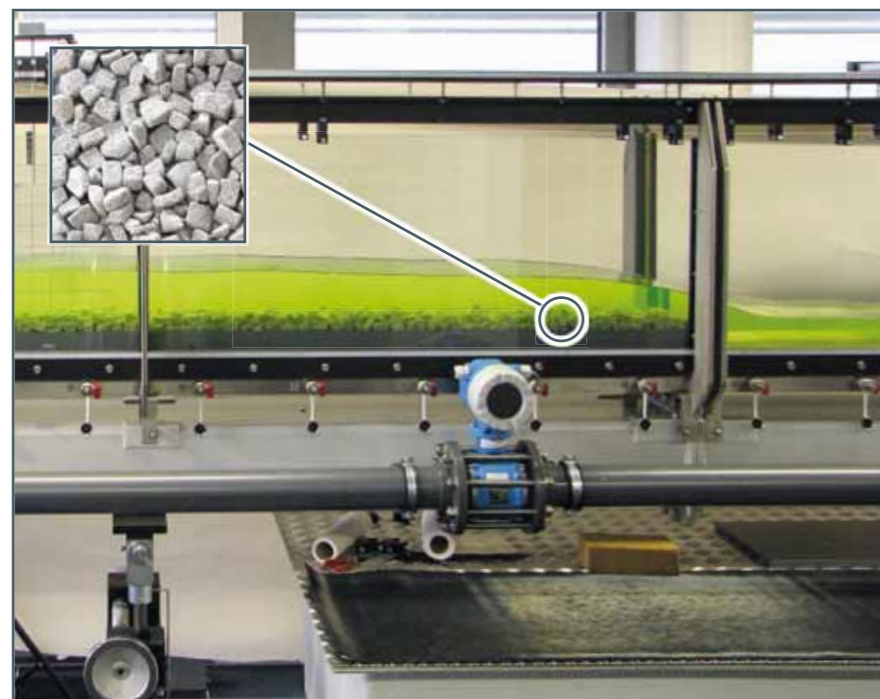
On distingue principalement deux types d'écoulements dans des canaux:

- l'écoulement uniforme (la profondeur de l'écoulement (profondeur d'eau) reste constante; accélération = décélération)
- l'écoulement non uniforme (la profondeur de l'écoulement change en fonction de l'accélération ou de la décélération)

Le débit peut être soit **sous-critique** (ou "fluvial"), **critique** ou **supercritique** (ou "torrentiel").



1 écoulement brusquement varié sous une vanne, 2 écoulement graduellement varié, 3 ressaut (brusquement varié), 4 chute de déversoir (brusquement varié), 5 écoulement graduellement varié, 6 écoulement non uniforme au niveau d'un changement de pente



HM 162.77
Fond du canal
avec galets

Profils de canaux typiques

Dans la plupart des cas, on peut reproduire de manière approximative la coupe transversale respective d'un écoulement dans des canaux avec quelques profils géométriques. Cercle, demi-cercle, rectangle, trapèze et associations de profils sont des outils parfaitement adaptés lorsqu'il s'agit de faciliter les calculs mathématiques, et le cas échéant de modéliser le canal. Il est souvent important de déterminer le débit Q et la profondeur de l'écoulement h à des positions définies. Les grandeurs typiques pour le calcul sont la surface traversée A , le périmètre mouillé P et le rayon hydraulique R .

Avec une **section rectangulaire**, les grandeurs sont définies de la manière suivante:

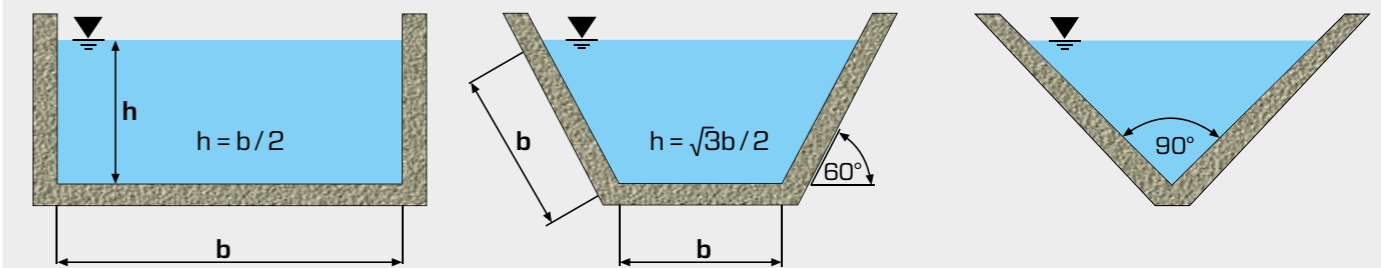
- surface traversée $A = bh$
- périmètre mouillé $P = b + 2h$
- rayon hydraulique $R = A / P = bh / (b + 2h)$
Avec des canaux larges et plats, le rayon hydraulique R correspond donc à la profondeur de l'écoulement h .

Pour les canaux artificiels, ce qu'on appelle le profil favorable à l'hydraulique est également une grandeur importante – un dimensionnement optimal du profil permet de réaliser des économies de matériel et de coûts:

- débit Q + pente de la ligne de charge J donnés: détermination de la surface traversée minimale A
- débit Q + surface traversée A donnés: détermination de la pente de la ligne de charge minimale J .

Coupes transversales hydrauliques optimales

En cas de périmètre mouillé minimum, par rapport à la surface donnée, on parle de coupe transversale hydraulique optimale.



Rectangle, trapèze avec angles à 60°, triangle; h profondeur de l'écoulement, b largeur de canal

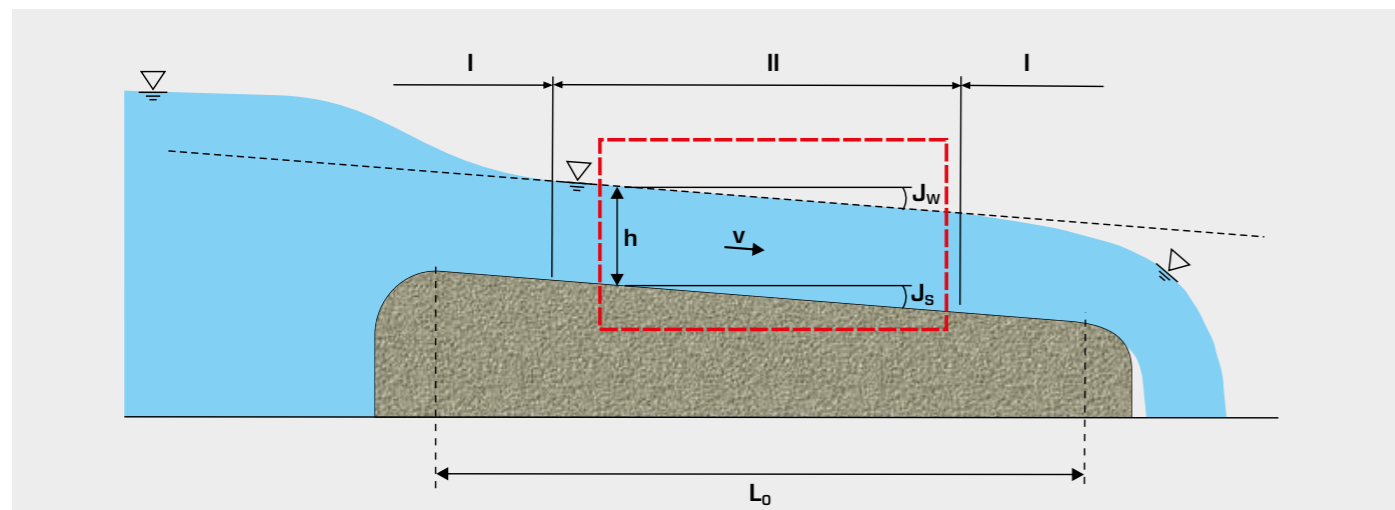
Les canaux d'essai de GUNT ont une section rectangulaire. Ils offrent la possibilité – outre le montage de différents modèles – de modifier la pente, de jouer sur la nature de la surface du fond du canal, et donc sur la rugosité. Il est possible de réaliser un grand nombre d'essais sur l'écoulement uniforme et

non uniforme dans des canaux avec les instruments permettant d'enregistrer la vitesse d'écoulement v et la profondeur de l'écoulement h .

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Écoulement uniforme dans un canal rectangulaire

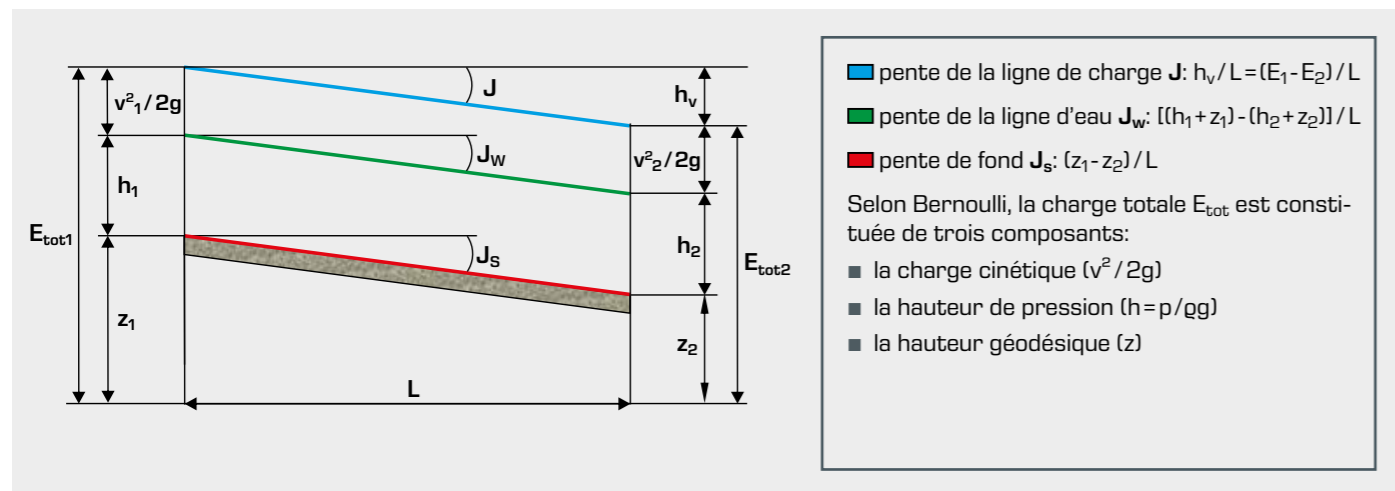


I écoulement non uniforme, II écoulement uniforme;
h profondeur de l'écoulement, J_s pente de fond uniforme, J_w pente de la ligne d'eau, L₀ longueur du canal avec pente de fond, J_s et largeur constante, v vitesse d'écoulement, cadre rouge volume de contrôle

Lorsque l'écoulement dans des canaux est uniforme, la profondeur de l'écoulement **h** reste identique, et donc parallèle au fond. Ce qui signifie par ailleurs que la vitesse d'écoulement **v** reste constante.

La profondeur de l'écoulement **h** correspond à la hauteur de pression (une composante de la charge spécifique). Ces charges spécifiques sont souvent tracées sous la forme de ce que l'on appelle des pentes de ligne. Dans la pente de la ligne de charge **J**,

la composante de référence est très souvent la profondeur de l'écoulement **h**. Lorsque l'écoulement dans des canaux est uniforme, la pente de la ligne de charge **J** est égale à la pente de fond **J_s** et la profondeur de l'écoulement **h** est donc identique. Avec un écoulement uniforme dans des canaux, on a ce que l'on appelle un **écoulement normal**, en d'autres termes, la pente de fond **J_s** compense les pertes par frottement du débit **Q**. La pente de la ligne de charge, la ligne d'eau et la pente de fond sont parallèles.



Formules de débit

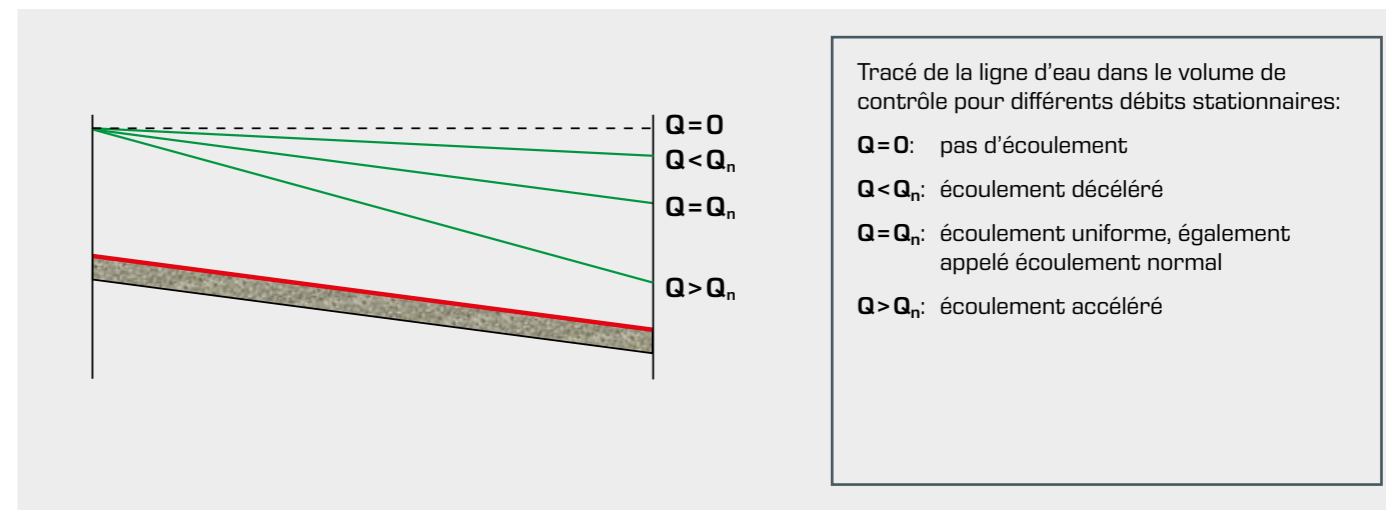
Les formules de débit décrivent la relation entre le débit **Q** et la profondeur de l'écoulement **h** avec une forme de coupe transversale et une caractéristique de rugosité données. La forme de la coupe transversale est prise en compte dans le rayon hydraulique, la profondeur de l'écoulement **h** intervient via la profondeur de l'écoulement **J**.

Les formules de débit couramment utilisées pour les canaux généraux sont les formules de

- Darcy-Weisbach
- Manning-Strickler (ou Gauckler-Manning-Strickler).

Les formules de débit sont basées sur des valeurs empiriques.

Écoulement stationnaire



Lorsque l'on considère la charge sur le volume de contrôle, on utilise l'équation de Bernoulli et l'équation de continuité.

Équation de continuité:

$$Q = \text{const} = AV = bhv \quad \text{ou} \quad bh_1v_1 = bh_2v_2$$

Équation de Bernoulli (conservation générale de l'énergie):

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{const}$$

Exprimée avec les charges, cela donne:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_2 + h_v \quad \text{avec perte par frottement } h_v$$

Avec $v = \frac{Q}{bh}$ de l'équation de continuité, cela donne:

$$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} + h_1 + (z_1 - z_2) = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_2^3} + h_2 + h_v$$

Pour un écoulement normal, cela donne:

$$h_1 = h_2, \text{ on a donc } h_v = z_1 - z_2$$

La charge spécifique est définie comme suit

$$E = h + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gh^2}$$

Elle se compose de la charge cinétique et de la hauteur de pression.

On peut aussi écrire:

$$h^3 - Eh^2 + \frac{Q^2}{2g} = 0$$

On obtient comme résultat une équation du 3^{ème} degré pour la profondeur de l'écoulement **h**. La profondeur de l'écoulement **h** dépend de la charge spécifique **E** et du débit **Q** ou de la pente et de la rugosité.

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Écoulement non uniforme dans un canal rectangulaire

Dans de nombreux cas, le débit Q dans un canal n'est pas uniforme. On fait la distinction entre écoulement **graduellement varié** et écoulement **brusquement varié**.

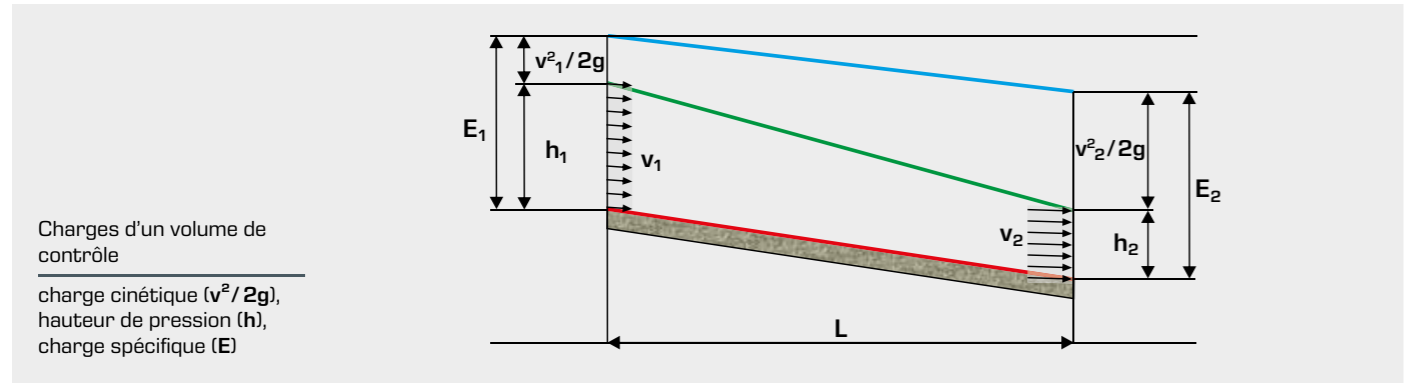
- écoulement graduellement varié: la profondeur de l'écoulement h change, le débit Q ou le régime lui-même est (en premier lieu) **sous-critique**. L'écoulement graduellement varié apparaît par exemple dans un canal ayant une faible pente ou une forte rugosité.
- l'écoulement brusquement varié se forme lui par exemple en cas d'écoulement dans des déversoirs. L'écoulement est alors souvent **supercritique**.

Dans le cas de l'écoulement supercritique, c'est le contraire: faible profondeur de l'écoulement h et vitesse d'écoulement v élevée.

Le **changement d'écoulement** de sous-critique à supercritique se fait avec une modification continue de la profondeur de l'écoulement h , de la vitesse d'écoulement v et de la charge spécifique E , par ex. en cas d'augmentation de la pente.

Le changement d'écoulement de supercritique à sous-critique a lieu à l'inverse toujours avec un changement brusque de la profondeur de l'écoulement h et une perte de charge ΔE , par ex. dans le **ressaut**.

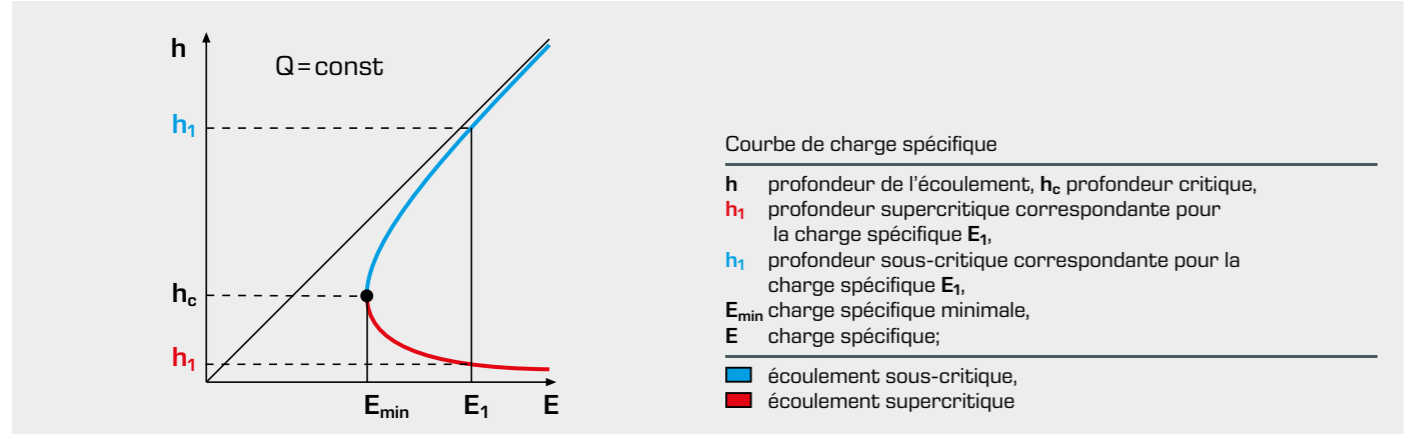
Rapport entre le débit Q , la charge spécifique E et la profondeur de l'écoulement h



Les considérations de l'énergie sur le volume de contrôle conduisent à une équation du 3^{ème} degré pour la profondeur de l'écoulement h . La profondeur de l'écoulement h dépend de la charge spécifique E et du débit Q . La profondeur de l'écoulement h est représentée graphiquement comme fonction de la charge spécifique E à un débit Q constant dans ce que l'on appelle une **courbe de charge spécifique**. La charge spécifique minimale E_{min} a une seule profondeur d'écoulement possible, aussi appelée profondeur critique h_c . À la profondeur critique h_c , on a un écoulement critique. Pour toutes les autres charges

spécifiques, on a ce qu'on appelle deux profondeurs correspondantes pertinentes d'un point de vue physique (cf graphique avec ressaut). Pour déterminer laquelle des deux profondeurs de l'écoulement est correcte, il faut effectuer chaque fois un calcul (pour voir si l'écoulement est sous-critique ou supercritique).

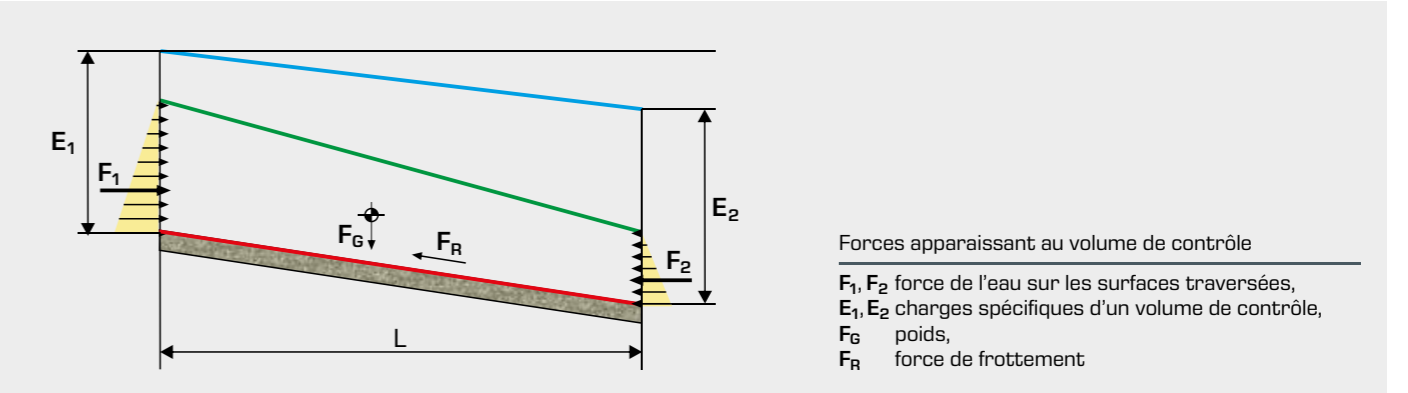
Le débit maximum Q à une charge spécifique E donnée peut également être déterminé.



Rapport entre principe de conservation de l'impulsion, force spécifique F et profondeur de l'écoulement h

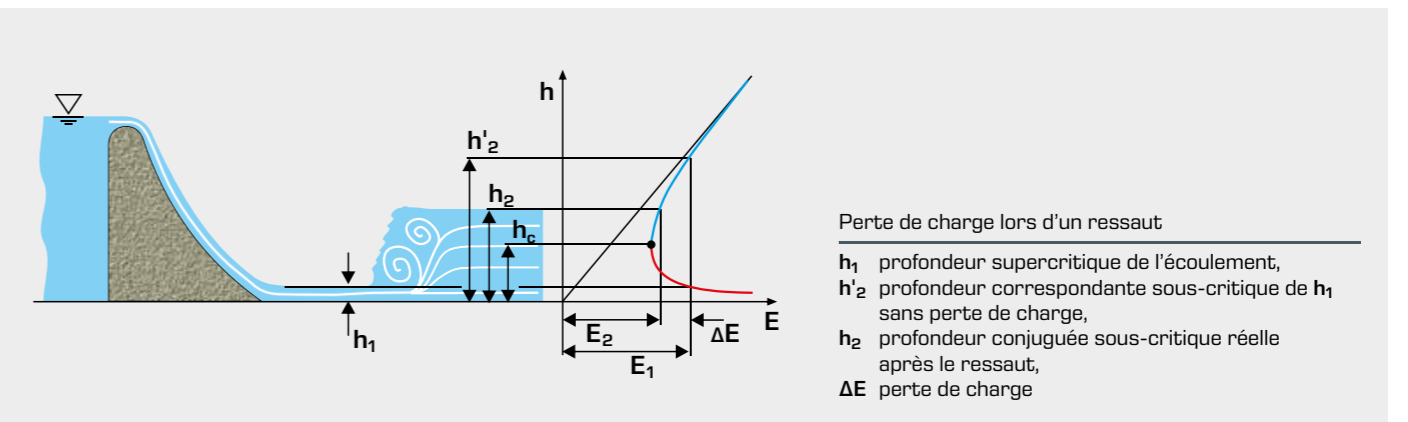
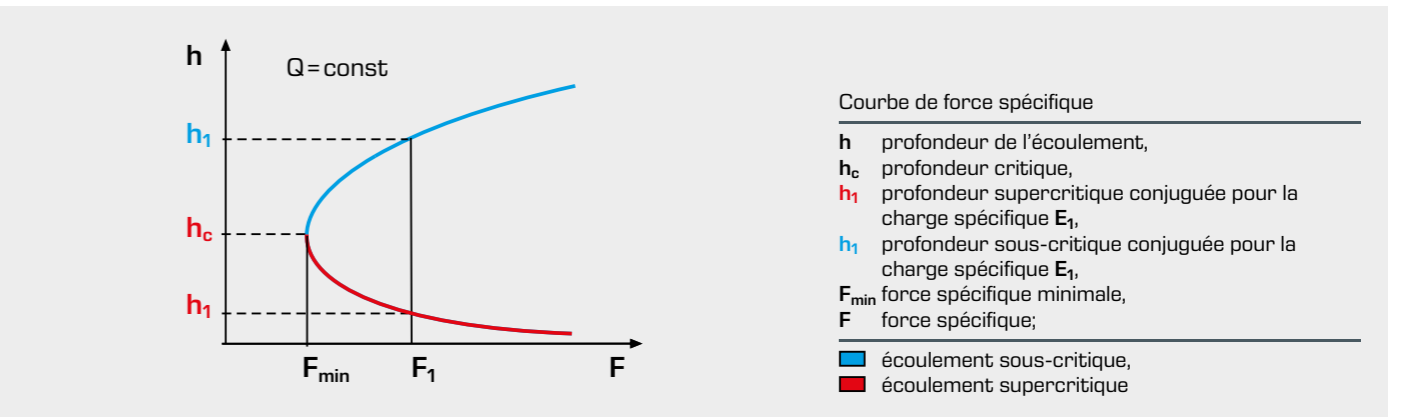
Le **principe de conservation de l'impulsion** constitue la 3^{ème} équation importante après celles de **Bernoulli** et de la **conservation de la masse**. L'équilibre des forces est établi au volume de contrôle. Dans de nombreux cas, on peut négliger l'influence du poids et de la force de frottement. Seules les forces intervenant

sur les surfaces traversées jouent alors un rôle: la force de compression statique et la force d'impulsion dynamique. Ce qu'on appelle la force spécifique F est la somme de ces deux forces; elle est déterminée au moyen du principe de conservation de l'impulsion.



La force spécifique peut également être représentée dans un graphique. Sur la **courbe de force spécifique**, on a tracé la profondeur de l'écoulement h en fonction de la force spécifique F à un débit constant Q . Comme sur la courbe de charge spécifique,

on obtient la force spécifique minimale F_{min} à la profondeur critique h_c . Pour toutes les autres forces spécifiques, il y a deux profondeurs conjuguées.



Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

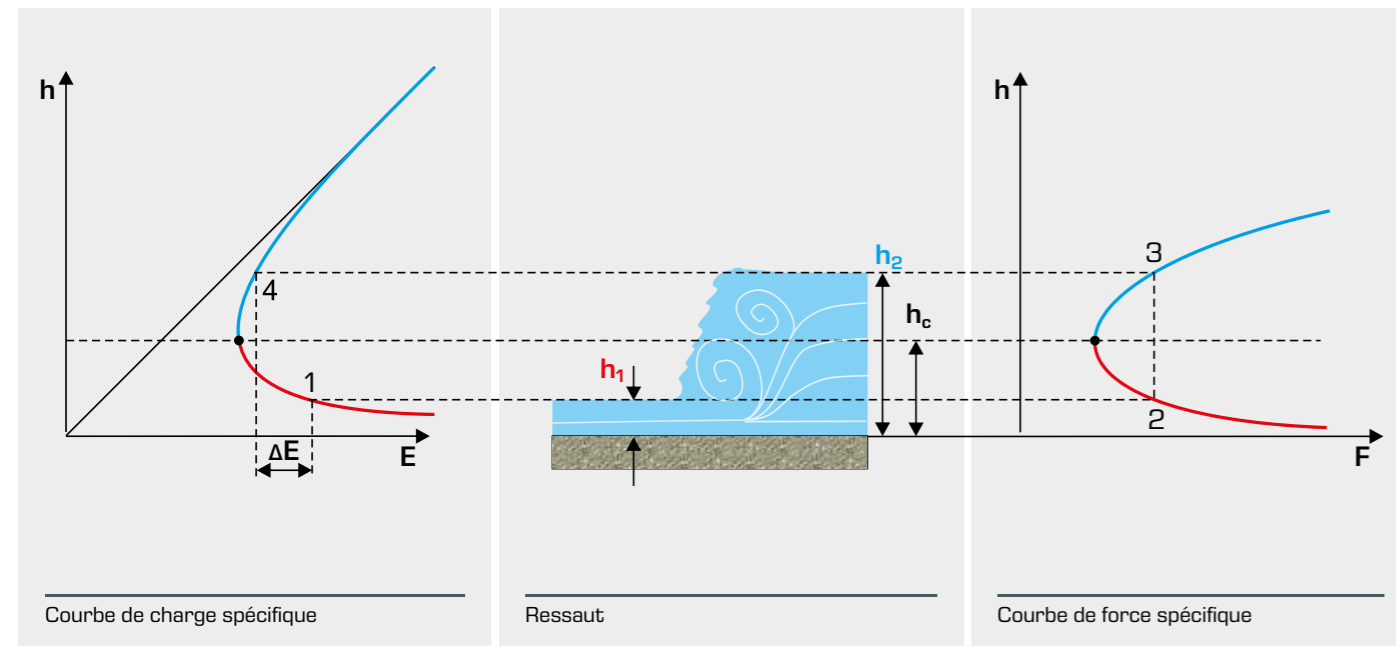
Détermination de la perte de charge lors d'un ressaut

Lors d'un ressaut, un débit d'écoulement supercritique Q redevient sous-critique. La profondeur de l'écoulement h change brusquement et est plus importante après le ressaut. De l'énergie se dissipe lors du ressaut sous l'effet des turbulences qui

se forment. L'impulsion est toutefois conservée, ce qui signifie que pour la même force spécifique F , il existe deux profondeurs conjuguées h distinctes. Le rapport entre les profondeurs conjuguées h_1 et h_2 est décrit par la formule suivante:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} + 1 \right) \quad \text{ou} \quad h_2 = \frac{-h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 4h_1 \frac{v_1^2}{2g}}$$

À l'aide de la courbe de charge spécifique donnée et d'une courbe de force analogique spécifique, on peut déterminer facilement la perte de charge ΔE graphiquement:



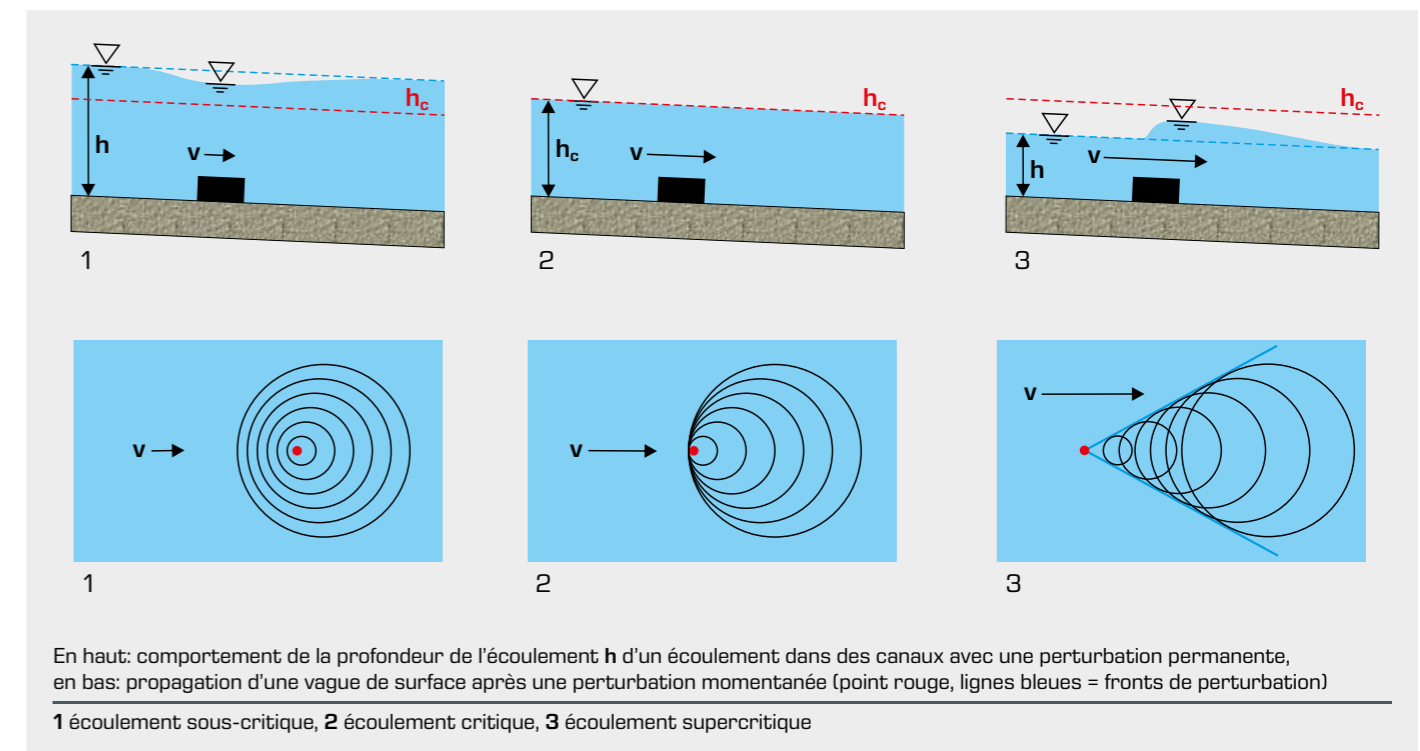
La profondeur de l'écoulement h_1 est reportée dans la courbe de charge spécifique et dans la courbe de force spécifique (points 1 et 2). Pour déterminer la profondeur de l'écoulement h_2 après le ressaut, on détermine graphiquement sur la courbe de force spécifique la profondeur conjuguée par rapport à h_1 (point 3). Les forces spécifiques F_1 au point 2 et F_2 au point 3 sont identiques

(conservation de l'impulsion). On reporte ensuite la profondeur de l'écoulement h_2 sur la courbe de charge spécifique (point 4). Les charges spécifiques E_1 et E_2 sont relevées sur le graphique. La perte de charge ΔE qui a lieu dans le ressaut correspond à la différence entre les charges spécifiques..

La perte de charge ΔE qui a lieu peut également calculée au moyen de la formule suivante:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Nombre de Froude et écoulement critique



Écoulement sous-critique

On observe des perturbations du comportement d'écoulement en amont. La vitesse d'écoulement v est inférieure à la vitesse de propagation c d'une vague de surface. Un écoulement sous-critique a normalement une profondeur de l'écoulement h élevée à une vitesse d'écoulement v faible.

Écoulement critique

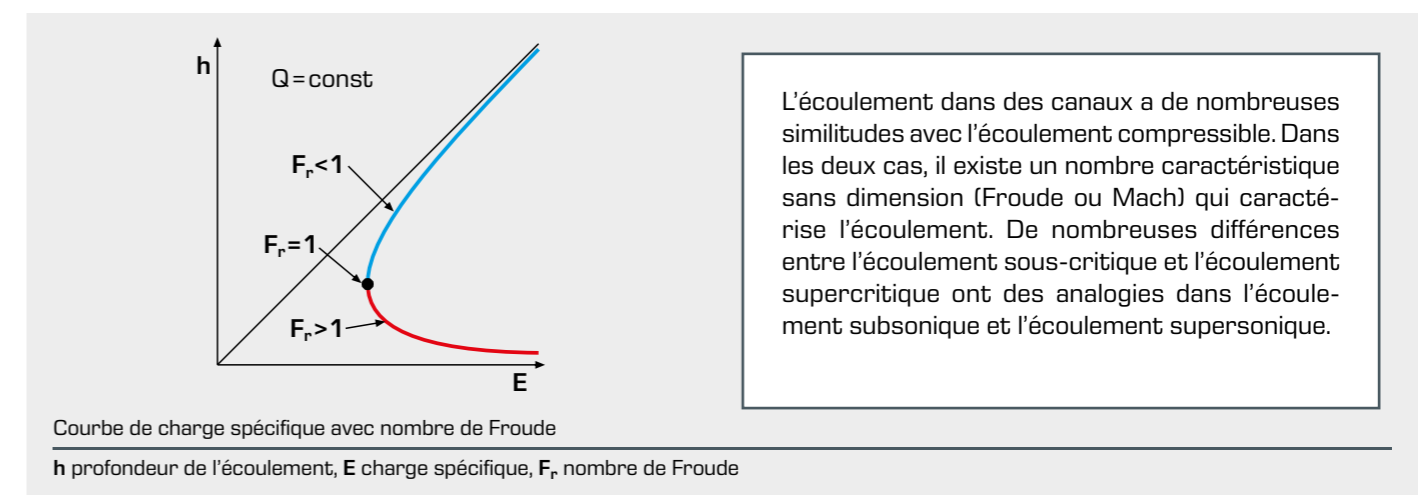
On n'observe aucune perturbation du comportement d'écoulement en amont. La vitesse d'écoulement v est égale à la vitesse de propagation c d'une vague de surface.

Écoulement supercritique

On n'observe aucune perturbation du comportement d'écoulement en amont. La vitesse d'écoulement v est supérieure à la vitesse de propagation c d'une vague de surface.

Le **nombre de Froude** décrit le rapport qui existe entre la vitesse d'écoulement v et la vitesse de propagation c d'une vague de surface et sert donc à déterminer le type d'écoulement (écoulement sous-critique ou écoulement supercritique). Un nombre de Froude identique correspond à une dynamique similaire de l'écoulement dans des canaux.

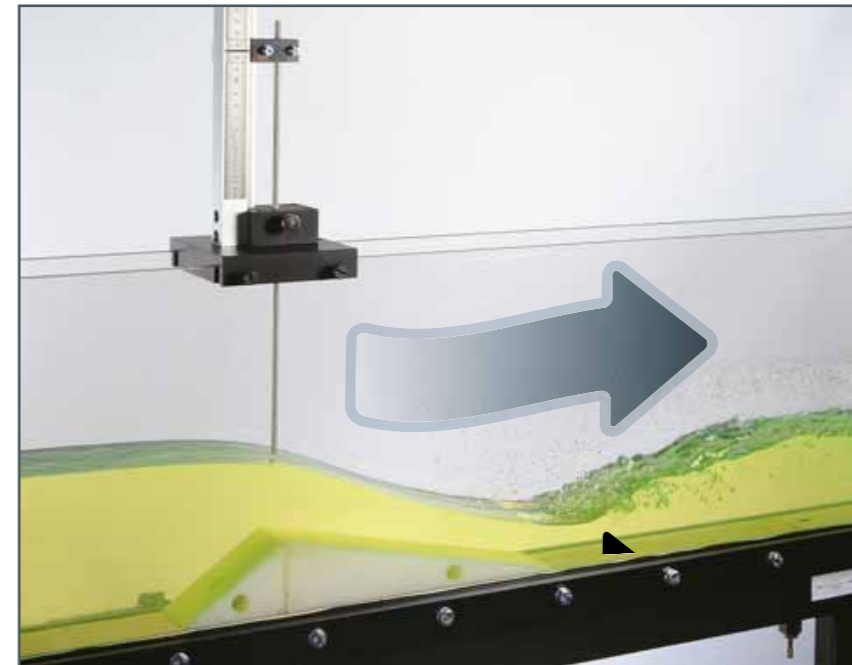
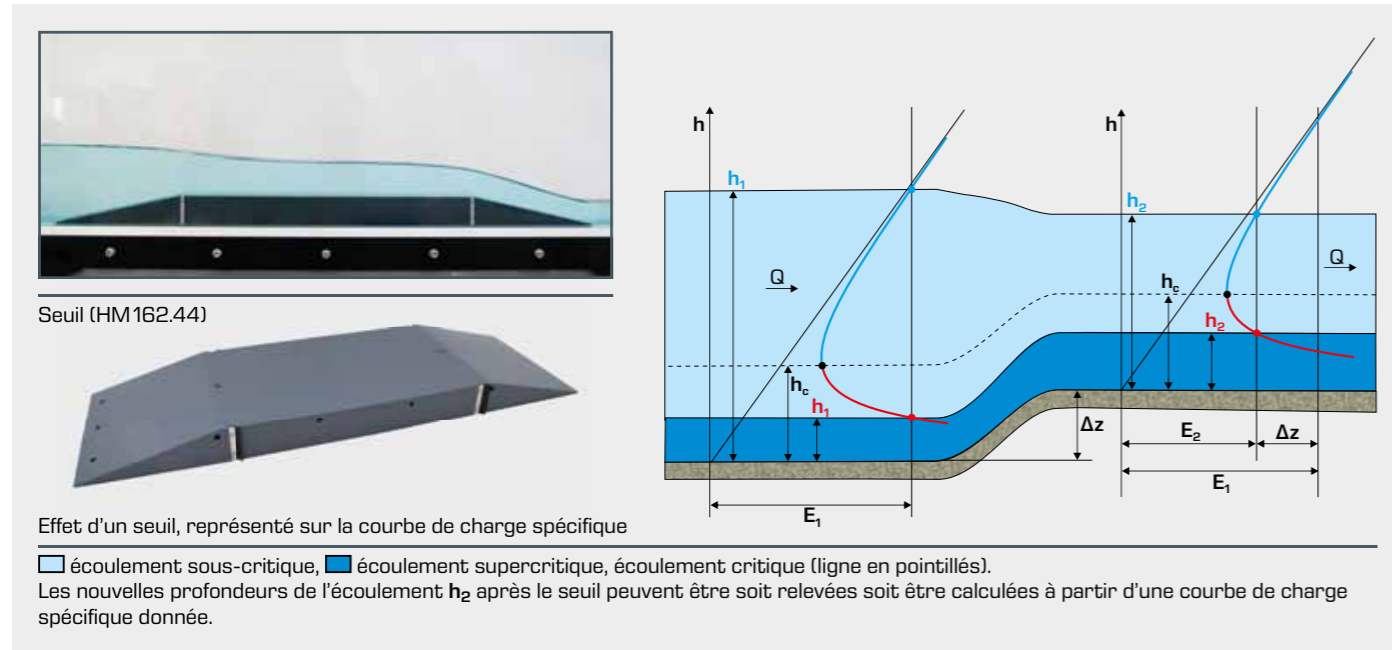
$Fr < 1$: sous-critique, $Fr = 1$: critique, $Fr > 1$: supercritique



Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Nombre de Froude et écoulement critique



Ressaut sur un déversoir

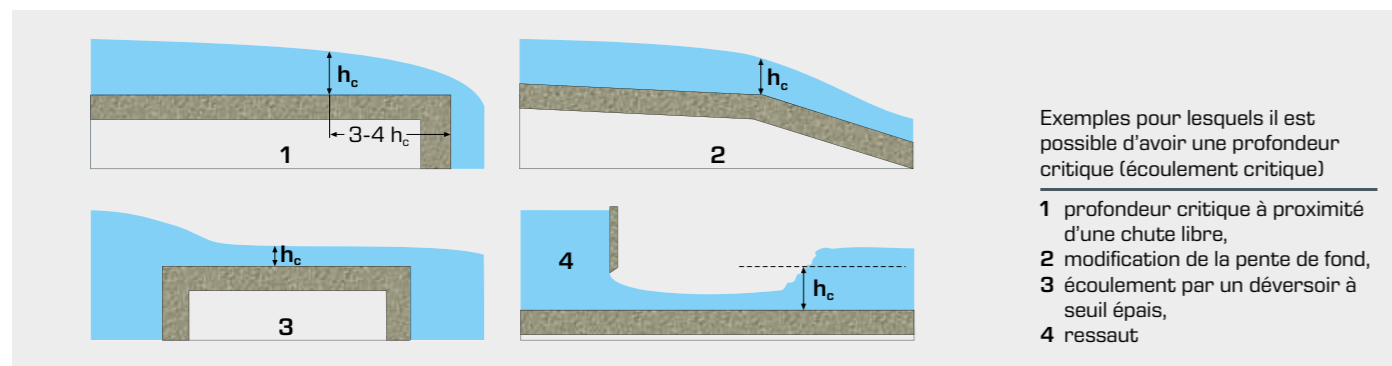


Ressaut dans un égout

Écoulement critique (nombre de Froude = 1)

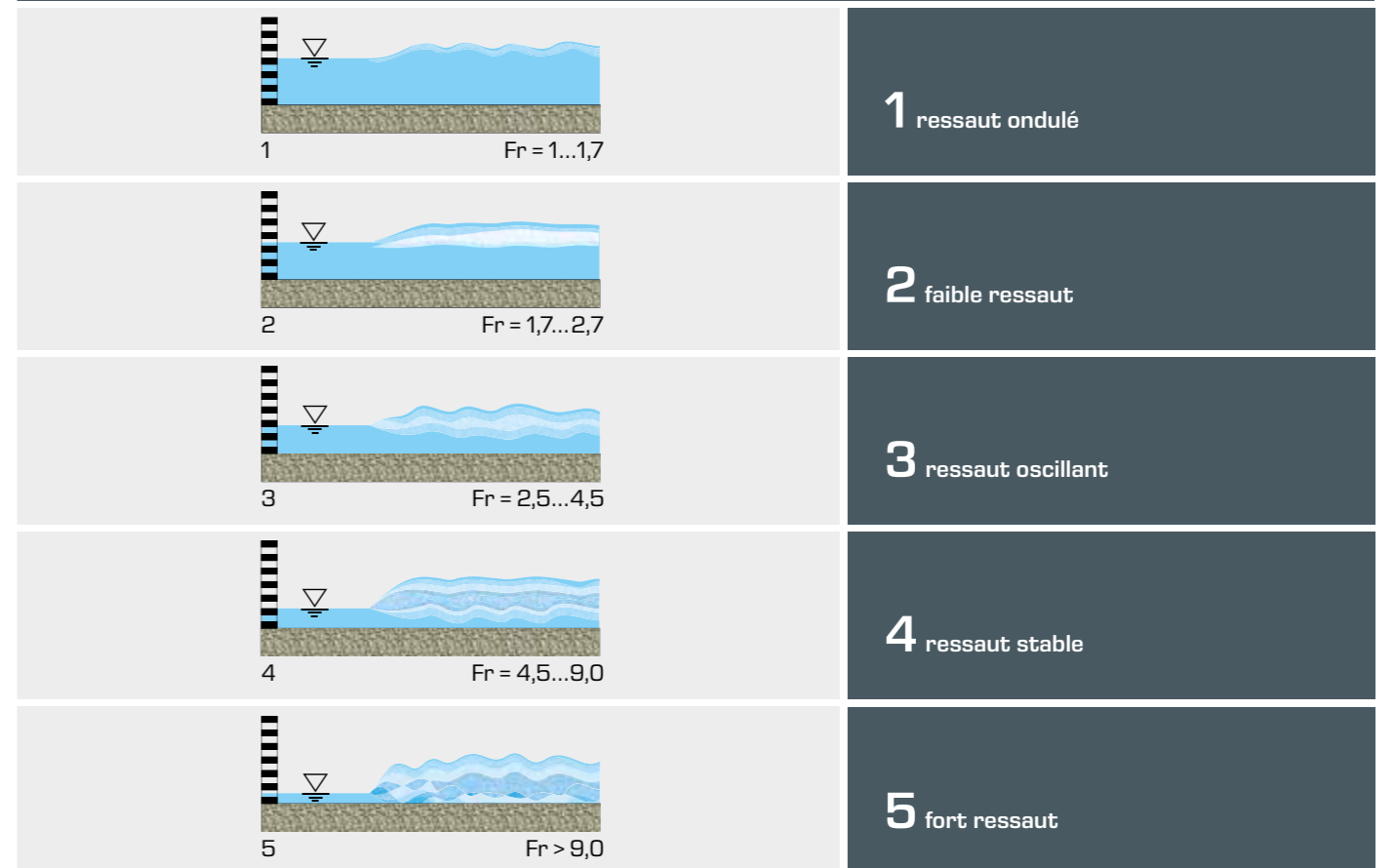
À la charge spécifique minimale E_{min} , la profondeur de l'écoulement h correspond à la profondeur critique h_c . Au niveau de ce point, le nombre de Froude est $Fr=1$, l'écoulement est critique et

la vitesse de propagation c est égale à la vitesse d'écoulement v . Au niveau de ce point, la force spécifique F dans le canal est également minimale.



Écoulement	Profondeur de l'écoulement	Vitesse d'écoulement	Pente	Nombre de Froude
Écoulement sous-critique	$h > h_c$	$v < v_c$	$J < J_{KRIT}$	$Fr < 1$
Écoulement critique	$h = h_c$	$v = v_c$	$J = J_{KRIT}$	$Fr = 1$
Écoulement supercritique	$h < h_c$	$v > v_c$	$J > J_{KRIT}$	$Fr > 1$
Pour canal rectangulaire	$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$	$v_c = \sqrt{gh_c}$		$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$

Formation du ressaut avec différents nombres de Froude



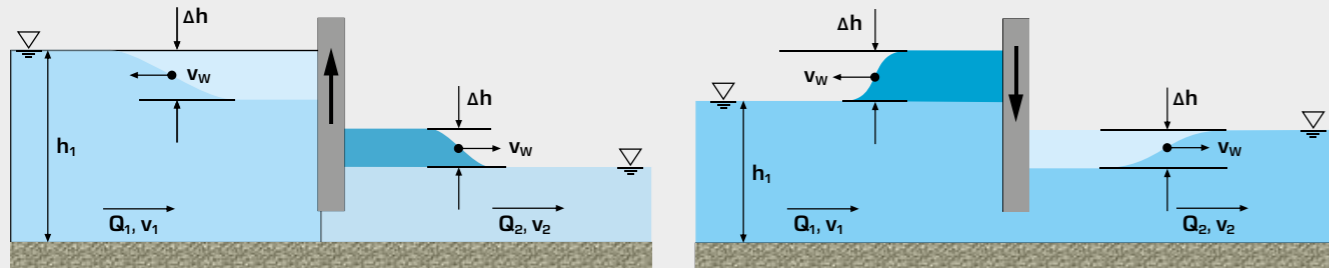
Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Montée et abaissement du niveau dans un canal ouvert

Les phénomènes de "montée du niveau" et d' "abaissement du niveau" dans un canal ouvert désignent des vagues qui se forment sous l'effet d'une modification soudaine du débit. Dans les conduites, un phénomène similaire est celui des coups de bélier. La modification soudaine du débit peut avoir lieu par exemple au moment de l'ouverture ou de la fermeture d'une vanne ou lors de la mise à l'arrêt de turbines. L'onde de choc se forme de manière abrupte (la vitesse de propagation de l'onde augmente avec l'augmentation de la profondeur de l'eau). L'onde négative est au contraire plutôt plate.

En première approche, la hauteur de la montée et de l'abaissement du niveau sont à peu près les mêmes et peuvent être calculées avec l'équation de continuité. En cas d'ouverture brusque (illustration de gauche) on parle d'abaissement du niveau dû au soutirage en aval et de montée du niveau d'eau, en cas de fermeture (illustration de droite), on parle d'onde positive de retenue et d'onde négative en aval.

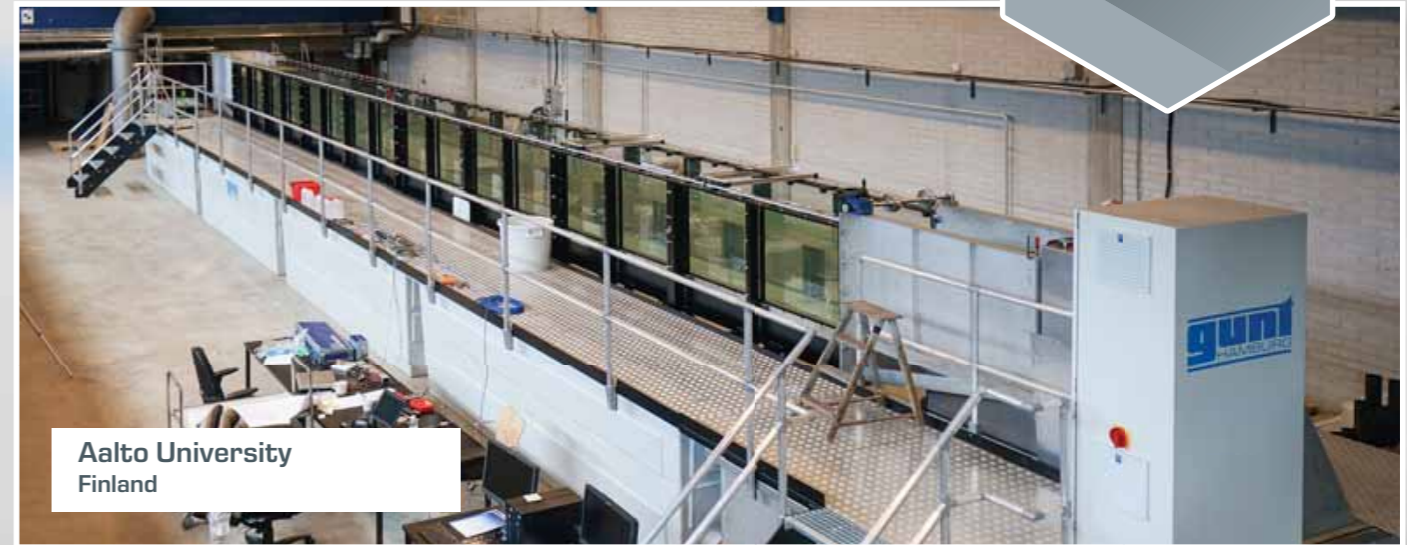


Ondes de choc et ondes négatives en cas d'actionnement soudain d'une vanne

à gauche ouverture de la vanne, à droite fermeture de la vanne;
 Q débit, h profondeur de l'écoulement, Δh hauteur d'onde positive ou hauteur d'onde négative,
 v vitesse d'écoulement, v_w vitesse de propagation de l'onde;
 Index 1 grandeurs avant la perturbation, Index 2 grandeurs après la perturbation,
 ■ onde de choc, □ onde négative



Onde de choc

Essai d'écoulement
dans des canaux

Aalto University
Finland



Federal Waterways Engineering
and Research Institute
Germany



University of Southampton
United Kingdom

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

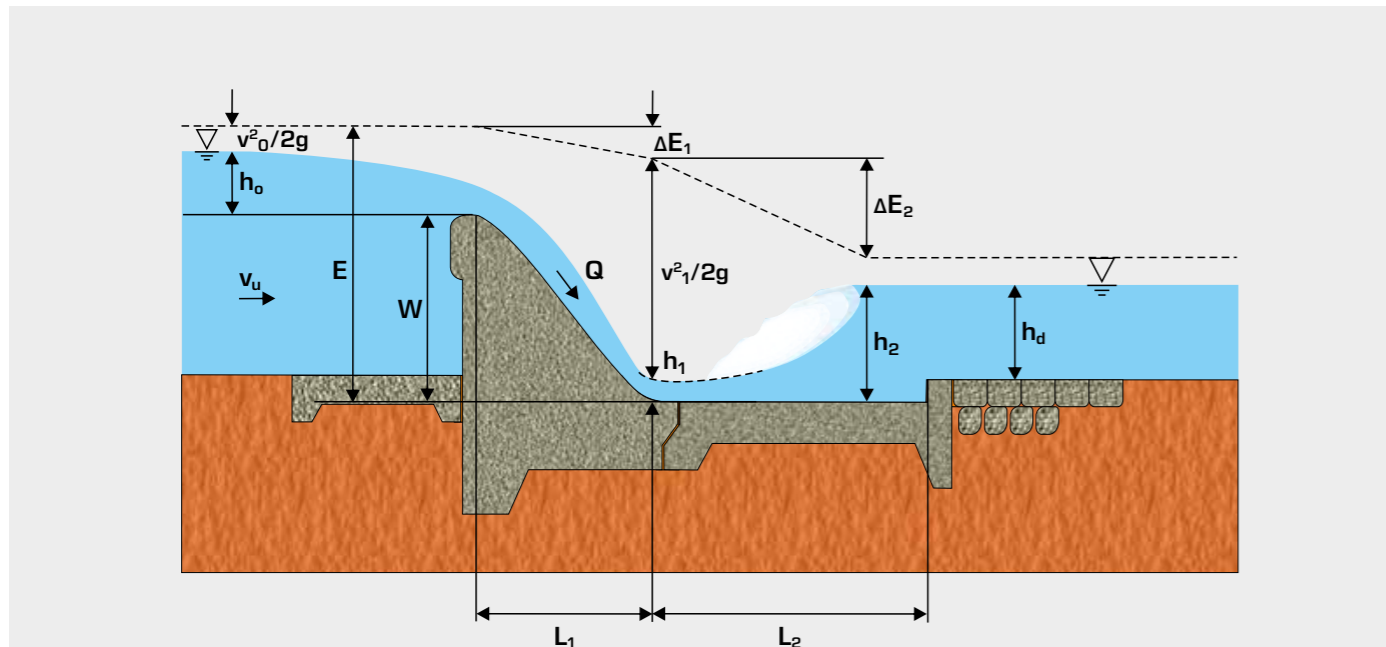
Dissipation d'énergie

L'écoulement supercritique en particulier a souvent une énergie d'écoulement élevée, qui se compose de l'énergie cinétique requise pour la poursuite de l'écoulement et de l'énergie en excédent. L'énergie en excédent peut entraîner entre autres une érosion des fonds. C'est pourquoi il est important de dissiper cette énergie en excédent. Ce qui peut être réalisé dans le ressaut mentionné précédemment (formé librement ou intentionnellement dans le bassin d'amortissement) ou dans des chutes spécialement conçues à cet effet (en forme d'escalier ou de saut de ski). Un jet libre se forme sur un dos de déversoir

avec obstacle en forme de saut de ski, qui jaillit dans l'air et dissipe son énergie après avoir percuté le fond (voir photo en bas à gauche).

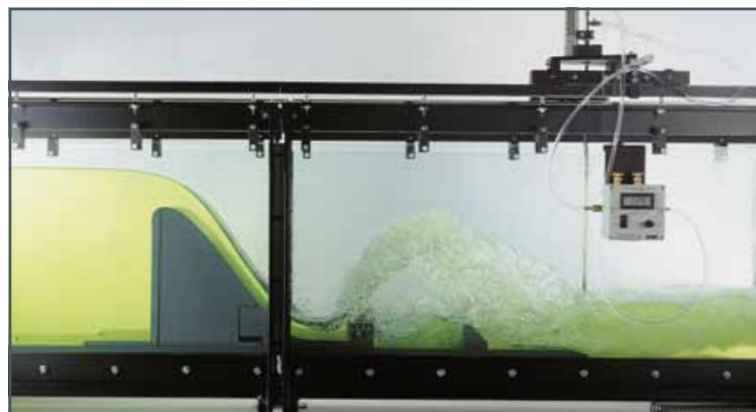
On trouve de l'énergie en excédent aux endroits suivants:

- au niveau d'étranglements de la coupe transversale, par exemple déversoirs, vannes
- dans des canaux à forte pente ou des pentes abruptes
- en cas de modification de la profondeur de l'écoulement du fait d'obstacles



Écoulement supercritique sur le déversoir dénudé avec dissipation d'énergie consécutive dans le bassin d'amortissement

h_0 hauteur, v_0 vitesse d'écoulement de l'eau en amont, W hauteur du déversoir, E charge spécifique, Q débit, h_1 profondeur de l'écoulement minimum, h_2 profondeur de l'écoulement après le ressaut, h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval, L_1 longueur du corps de déversoir, L_2 longueur du bassin d'amortissement, ΔE dissipation d'énergie (perte de charge); **ligne en pointillés** ligne de charge



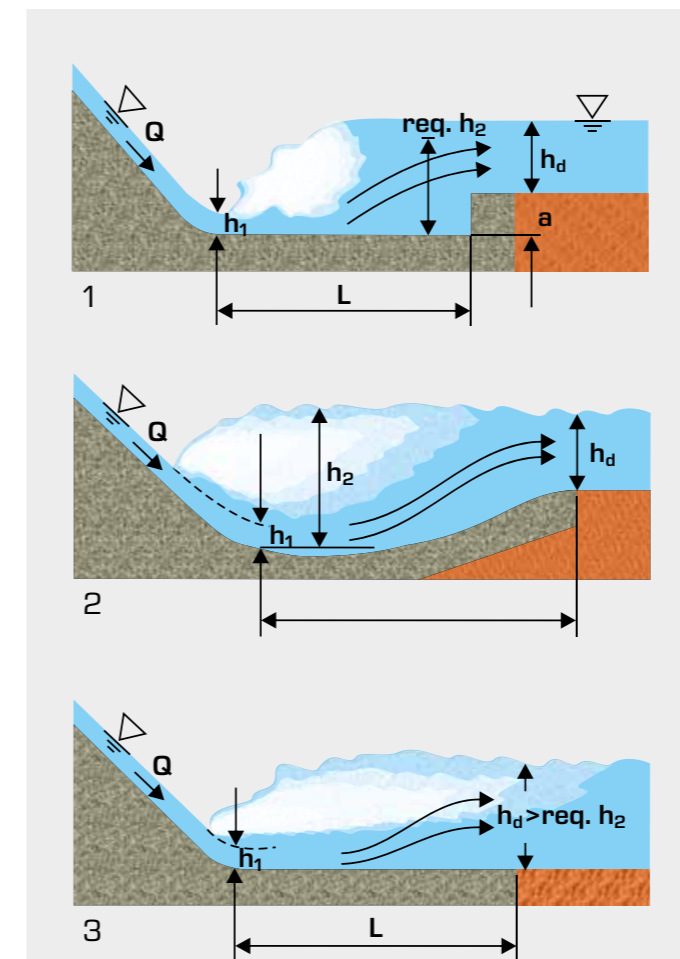
HM162 avec déversoir à crête arrondie HM162.32 et seuils de HM162.35



Déversoir à crête arrondie HM162.32

Les bassins d'amortissement ont les fonctions suivantes:

- stabilisation du ressaut à un endroit défini (la position du ressaut peut sinon varier en fonction de la profondeur de l'écoulement h ou les conditions de retenue dans l'eau en aval)
- en plus du ressaut, dissipation supplémentaire d'énergie par des éléments de construction tels que blocs de dissipation d'énergie ou seuils
- protection du fond du canal contre l'érosion et la formation d'affouillement (dépression en forme d'entonnoir ou de cuvette au fond du canal)
- transformation de l'énergie (cinétique, potentielle) en excédent d'eau en énergie thermique et en énergie sonore; une bonne transformation de l'énergie a lieu avec des nombres de Froude compris entre 4 et 8.



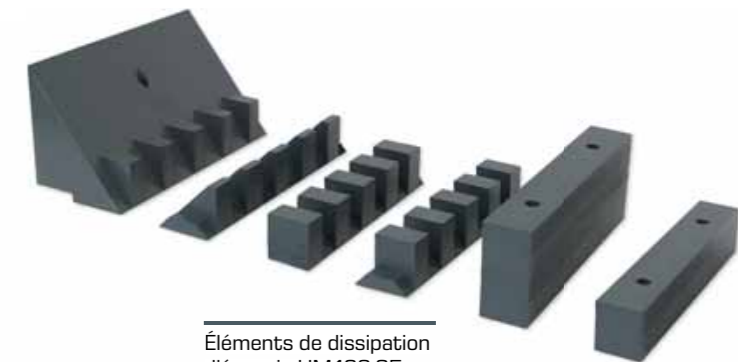
Formes de construction des bassins d'amortissement

- 1 avec dépression, 2 avec dépression en forme d'auge, 3 sans dépression;
 a étage positif, Q débit, L longueur du bassin d'amortissement, h_1 profondeur de l'écoulement au début du bassin d'amortissement, h_2 profondeur conjuguée dans le ressaut, h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval, $req. h_2$ profondeur d'écoulement requise en théorie

Il est important que le ressaut ne se déplace pas du bassin d'amortissement en direction de l'eau en aval et y provoque un affouillement. A cet effet, il est conseillé d'avoir une retenue légère. On utilise un ratio spécifique pour calculer la retenue du bassin d'amortissement. Il s'agit du rapport entre la profondeur de l'écoulement réelle h et la profondeur de l'écoulement requise en théorie $req. h$ ("required").

Le bassin d'amortissement peut être rendu plus efficace par le biais d'actions diverses. Il est possible d'élargir la section d'écoulement ou d'ajouter ce que l'on appelle des blocs de chute.

Il est possible aussi d'intégrer des blocs de chute et des seuils au fond du bassin d'amortissement des canaux d'essai de GUNT. Ces éléments destinés à la dissipation d'énergie facilitent la transformation de l'énergie, accélérant ainsi sa dissipation.



Éléments de dissipation d'énergie HM162.35

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Ouvrages de contrôle

Les ouvrages de contrôle sont des éléments courants des canaux; ils ont les fonctions suivantes:

- hausse du niveau d'eau, pour obtenir par exemple une profondeur suffisante d'un chenal pour faciliter la navigation des bateaux, pour une exploitation de l'énergie hydraulique, pour une protection contre l'érosion par une réduction de la vitesse d'écoulement
- régulation du débit
- mesure du débit

Les **déversoirs** et **vannes** sont des ouvrages de contrôle typiques. Ce qui les distingue l'un de l'autre est le fait que l'écoulement se fasse par dessus (**pour le déversoir**) ou par dessous (**pour la vanne**). Les ouvrages de contrôle sont soit **fixes**, soit **mobiles**. Les **vannes** sont le plus souvent mobiles, elles peuvent réguler le niveau de l'eau et le débit. Les mouvements peuvent être: levables, abaissables, elles peuvent aussi être tournants, rotatifs, roulants ou être commandés par des associations des mouvements mentionnés. Les **déversoirs** peuvent être fixes ou mobiles. Les déversoirs fixes ne peuvent pas réguler le niveau de l'eau, mais offrent l'avantage de ne pas comporter de pièces mobiles sujettes à des dysfonctionnements et nécessitant une maintenance intensive. Une forme spéciale de déversoir fixe est le déversoir à siphon (voir page 92).

Dans la zone de l'ouvrage de contrôle, l'écoulement passe de sous-critique à supercritique.

Les ouvrages de contrôle réels sont constitués par les éléments suivants:

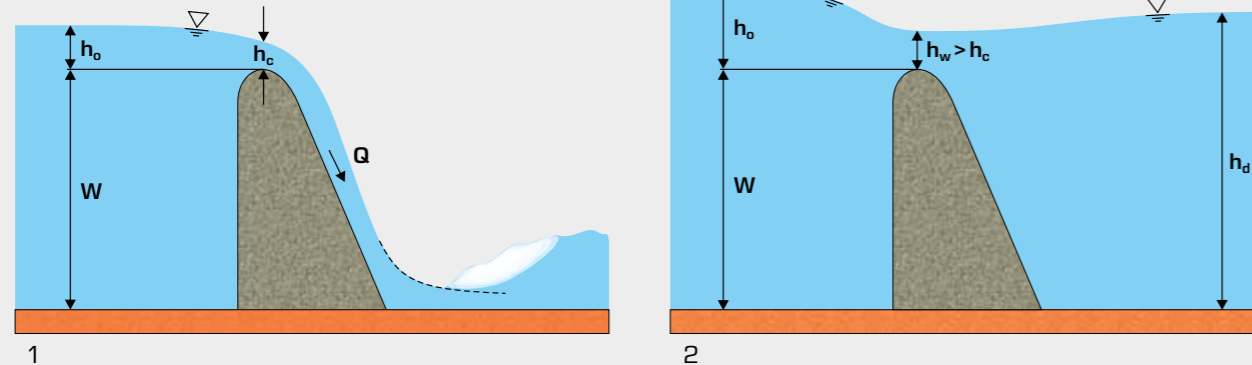
- corps de barrage (produit une hausse du niveau d'eau); peut être fixe, mobile ou les deux à la fois
- bassin d'amortissement: dissipation d'énergie de l'écoulement
- fixation du radier dans l'eau en amont et l'eau en aval, ouvrages de raccordement (bajoyers)
- constructions de continuité écologique

Conditions de nappe au niveau du déversoir

On peut trouver deux **conditions de nappe** au niveau du déversoir. Dans le cas de la **nappe dénoyée**, l'eau en amont n'est pas influencée par l'eau en aval. L'écoulement est critique au niveau de la crête de déversoir. La crête de déversoir se situe au-dessus du niveau aval. Le déversoir est qualifié de **déversoir dénoyé**.

Dans le cas de la **nappe noyée**, l'eau en amont est influencée par l'eau en aval. Le déversoir agit comme ce que l'on appelle un **déversoir noyé** et est très souvent entièrement immergé.

Lorsque la **nappe est dénoyée**, les déversoirs découplent le niveau de l'eau en amont de celui de l'eau en aval. Dès lors que l'eau en aval submerge les crêtes de déversoir au point qu'au-dessus d'elle la profondeur critique est dépassée, on a une **nappe noyée**.



1 nappe dénoyée, 2 nappe noyée;
W hauteur du déversoir, h_0 hauteur, h_c profondeur critique, Q débit, h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval, h_w profondeur de l'écoulement sur la crête de déversoir

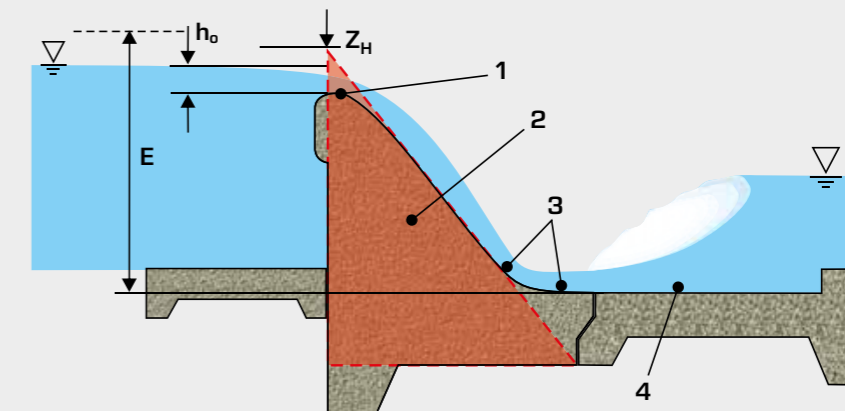
On distingue principalement trois **types de déversoirs**:

- à **paroi mince**
- à **crête arrondie** / arrondi (déversoir dénoyé)
- à **seuil épais**

Les déversoirs à paroi mince sont utilisés de préférence comme déversoir de mesure; on trouve souvent les déversoirs à crête arrondie comme déversoir de retenue et évacuateur de crue et les déversoirs à seuil épais servent souvent de seuil et d'ouvrage submergé.

Les trois types de déversoirs sont étudiés dans les canaux d'essai de GUNT.

Ouvrages de contrôle: écoulement par des déversoirs fixes



Ouvrage de contrôle simplifié:
déversoir à crête arrondie avec bassin d'amortissement

1 crête de déversoir, 2 corps de déversoir, 3 doucine, 4 bassin d'amortissement; Z_H niveau maximal de la retenue le plus élevé, h_0 hauteur, E charge spécifique;
■ triangle de base du déversoir utilisé comme aide au dimensionnement

Les déversoirs fixes sont souvent utilisés pour retenir les eaux d'une rivière. Le déversoir lui-même est constitué d'un corps de barrage massif. Le moment appliqué par la pression de l'eau est compensé par le poids du barrage. C'est la raison pour laquelle les déversoirs sont normalement construits de telle manière à ce que leurs contours externes correspondent à peu près à un triangle. Le dos de déversoir peut être conçu de manière à favoriser l'écoulement, afin d'atteindre un débit Q maximum. Le **profil WES** est un profil d'écoulement favorable à l'hydraulique qui a été développé par l'armée américaine à la **Waterways Experi-**

mental Station de Vicksburg, MS, aux États-Unis. La conception du profil WES ne suppose pas la présence de ce que l'on appelle le débit de dimensionnement. En général, des débits inférieurs au débit de dimensionnement sont évacués par le déversoir. Le déversoir est donc optimisé pour un débit un peu inférieur. Pour les débits inférieurs ou égaux au "débit de projection", le profil d'écoulement reste stable, les décollements de la lame sont évités. Dans le cas où on a le débit de dimensionnement, de faibles sous-pressions se forment sur le dos de déversoir. Ceux-ci ne présentent néanmoins aucun danger pour le déversoir.

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Ouvrages de contrôle:
types de chutes sur le déversoir

Il existe deux types de chute: ce qu'on appelle le **déversoir à chute libre** et le **déversoir à profil hydrodynamique**. Pour les deux types de chute, la condition de nappe peut être noyée ou dénoyée.

Pour le cas du **déversoir à chute libre**, il est important que la lame déversante soit aérée afin qu'elle tombe librement. Sans aération, des dysfonctionnements peuvent se produire et entraîner une baisse de débit.

Dans le cas du **déversoir à profil hydrodynamique** sur un déversoir fixe, il est important d'éviter tout décollement de la lame (débit réduit) ainsi que des dépressions trop élevées (risque de cavitation).



Déversoir à chute libre au niveau du déversoir de mesure

Ouvrages de contrôle: calcul du débit sur le déversoir

Le calcul du débit joue un rôle important dans le cadre de l'écoulement à travers des ouvrages de contrôle. Pour calculer le débit, on utilise la **formule de Poleni**. Pour un déversoir avec nappe dénoyée, on applique la relation:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b h_0 \sqrt{2gh_0}$$

μ est un facteur qui tient compte de la géométrie du déversoir (voir Tableau), b est la largeur de crête du déversoir, h_0 est la hauteur.

Dans le cas de la nappe noyée, l'équation est complétée par un facteur de réduction relevé sur les graphiques correspondants.

En se servant de l'équation de Bernoulli, on peut calculer la charge spécifique E à partir de l'énergie cinétique (vitesse d'approche v_0) et de la profondeur h_0 de l'eau en amont. v_0 a souvent une valeur relativement faible et est donc ignorée.

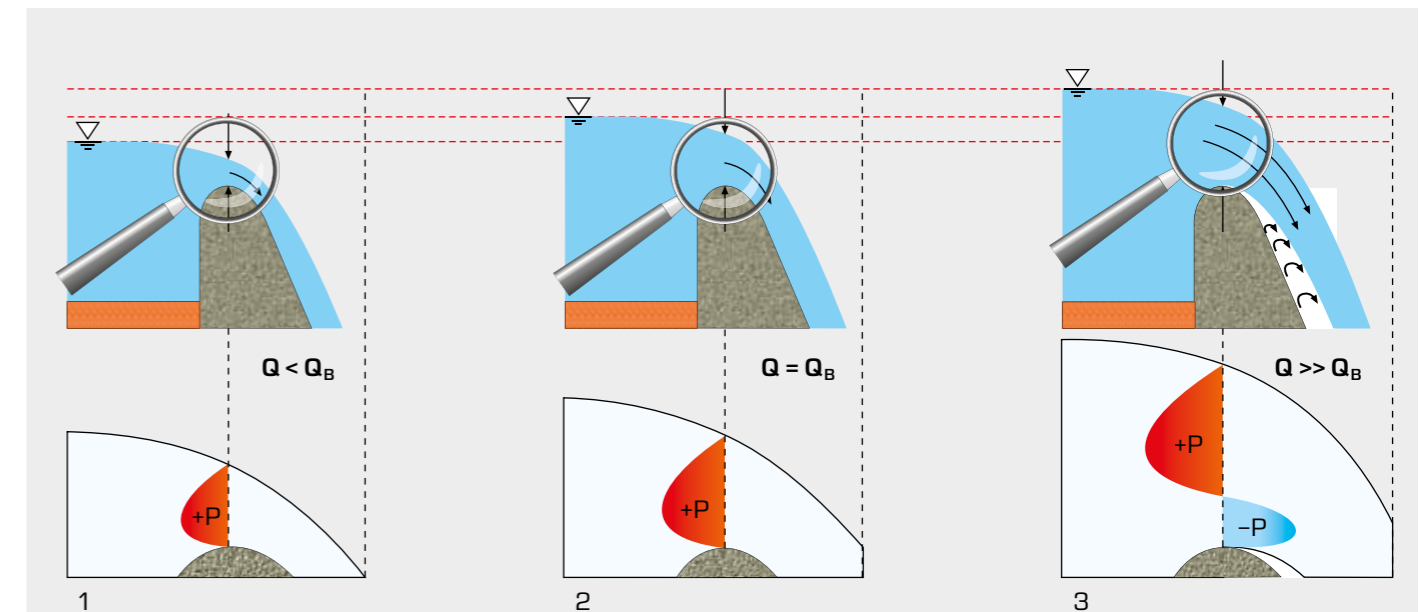
L'écoulement appliqué aux modèles étudiés avec les canaux d'essai GUNT est normal, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Les déversoirs considérés font donc partie du groupe des déversoirs fixes.

Dans la pratique, il existe aussi ce qu'on appelle des déversoirs latéraux utilisés pour l'évacuation de crues. Les déversoirs latéraux sont montés en parallèle à la direction de l'écoulement. Les déversoirs latéraux sont également des déversoirs fixes.

Ouvrages de contrôle: déversoirs à crête arrondie

Les déversoirs à crête arrondie fixes (en anglais, „Ogee weir”) sont utilisés avant tout comme évacuateur de crue. Ils ont habituellement un dos de déversoir favorable à l'écoulement, par exemple avec le profil WES.

Sur le déversoir à crête arrondie HM162.34 de GUNT, la distribution de la pression est mesurée le long du dos de déversoir et s'affiche directement sur un manomètre à huit tubes.



Déversoir à profil hydrodynamique sur le déversoir à crête arrondie, distribution de la pression sur la crête de déversoir avec différents débits

1 lame déversante sur la crête, 2 le dos de déversoir correspond à peu près au contour de la lame déversante libre, 3 lame déversante se décollant quand le débit est très élevé; Q débit, Q_B débit de dimensionnement

Coefficients de débit μ pour des déversoirs avec différentes formes de crête

	Formation des crêtes de déversoir	μ
	large, en à paroi mince, horizontal	0,49...0,51
	large, bords bien arrondis, horizontal	0,50...0,55
	large, crête de déversoir entièrement arrondie, réalisée par une vanne de retenue rabattue	0,65...0,73
	à paroi mince, lame déversante aérée	≈ 0,64
	à crête arrondie, côté de l'eau en amont vertical et côté de l'eau en aval incliné	0,73...0,75
	en forme de toit, crête de déversoir arrondie	0,75...0,79



Distribution de la pression sur le déversoir à crête arrondie HM162.34

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux



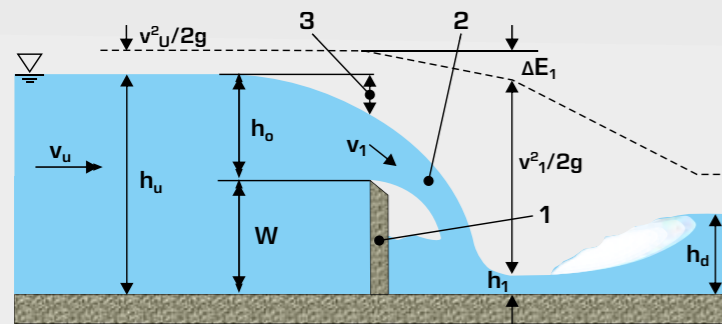
Ouvrages de contrôle: déversoirs à paroi mince

Sur le déversoir à paroi mince, on a également la nappe dénoyée et la nappe noyée. Pour obtenir un débit optimal sur le déversoir à paroi mince, il est important que la lame déversante soit aérée. La pression qui règne sur les parties supérieure et inférieure de la lame déversante aérée est la pression ambiante.

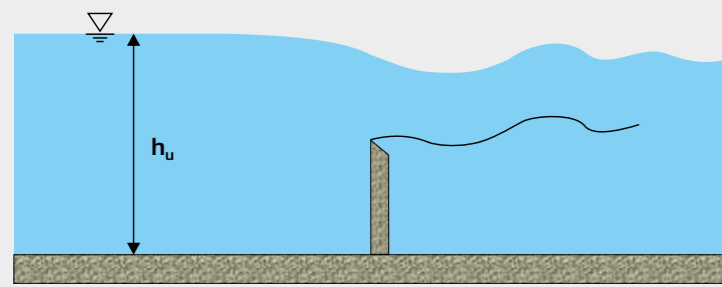
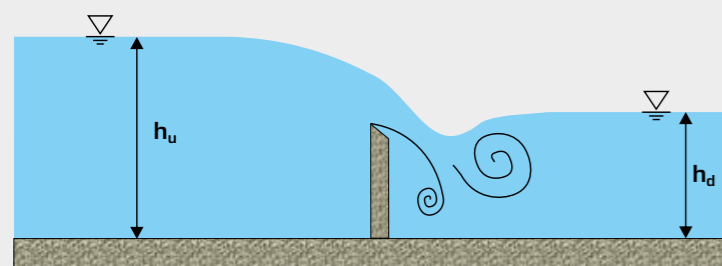
Les grandeurs typiques sont la hauteur du déversoir W , la hauteur h_o au-dessus de la crête de déversoir de l'eau en amont et la profondeur d'écoulement de l'eau en aval h_d . Avec la largeur du déversoir b , ces grandeurs sont intégrées à la formule de Poleni (p. 88) pour le calcul du débit. Certaines grandeurs sont intégrées indirectement dans des coefficients ou des facteurs de réduction.



HM162.30
Jeu de déversoirs à paroi mince, quatre types



Nappe dénoyée aérée au niveau du déversoir à paroi mince
1 déversoir, 2 lame déversante, 3 abaissement;
 v_u vitesse dans l'eau en amont,
 v_1 vitesse dans la lame déversante,
 h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval,
 h_o hauteur,
 h_u profondeur de l'eau en amont,
 W hauteur du déversoir



Nappe noyée
1 sur le déversoir à paroi mince partiellement immergé,
2 sur le déversoir à paroi mince entièrement immergé (débit ondulé)

Ouvrages de contrôle: déversoirs à seuil épais

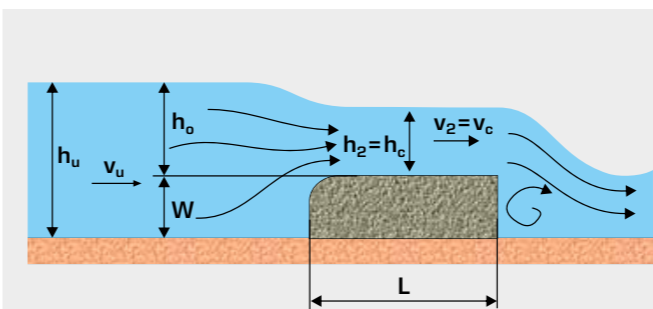
Les déversoirs à seuil épais sont des ouvrages submergés utilisés dans les eaux courantes dans lesquelles le débit varie peu et pour lesquelles on souhaite obtenir un niveau maximal de retenue relativement faible. Ils peuvent en outre constituer la partie inférieure d'un ouvrage de contrôle mobile.

Les déversoirs à seuil épais sont caractérisés par le fait qu'une courte section d'écoulement pratiquement uniforme avec profondeur critique se produit sur la crête de déversoir (voir illustration). On a sur cette section une répartition de la pression hydrostatique, et les lignes de courant sont pratiquement horizontales. Ces conditions sont valables tant que le ratio hauteur sur longueur du déversoir h_o/L est compris entre 0,08 et 0,5. Les déversoirs à seuil épais ayant ces dimensions peuvent être également utilisés comme **déversoir de mesure**.

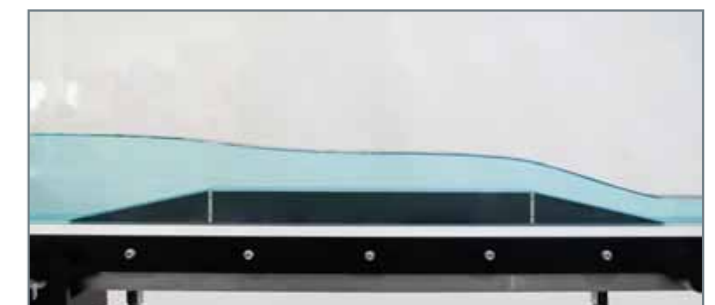
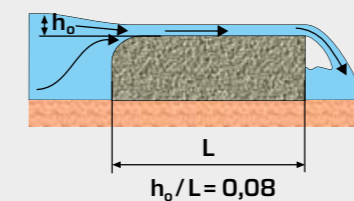
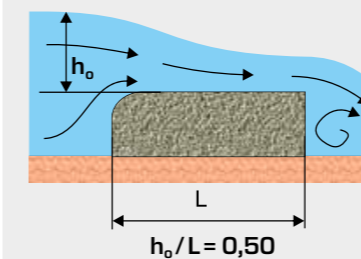
Dès lors que $h_o/L < 0,08$, les pertes par frottement ne peuvent plus être négligées, le corps de déversoir est trop long pour pouvoir servir de déversoir de mesure. Lorsque $h_o/L > 0,5$, c'est-à-dire avec des corps de déversoir courts, les lignes de courant ne sont pas horizontales, la distribution de la pression n'est pas hydrostatique, et on ne peut donc pas utiliser les méthodes de calcul présentées dans cette brochure.

Pour des raisons écologiques on utilise aujourd'hui rarement un déversoir à seuil épais comme seuil dans les rivières. On lui préfère la construction d'une rampe afin que les poissons et autres créatures aquatiques puissent nager en amont.

Les canaux d'essai GUNT permettent d'étudier différents déversoirs à seuil épais et les débits respectifs Q .



Déversoir à seuil épais
 v_u vitesse d'écoulement de l'eau en amont,
 h_u profondeur de l'eau en amont,
 W hauteur du déversoir,
 h_c profondeur critique,
 L longueur du déversoir;
Les flèches montrent les lignes de courant



Seuil HM162.44



Déversoir cunéiforme HM162.33



Déversoir à seuil épais HM162.31

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

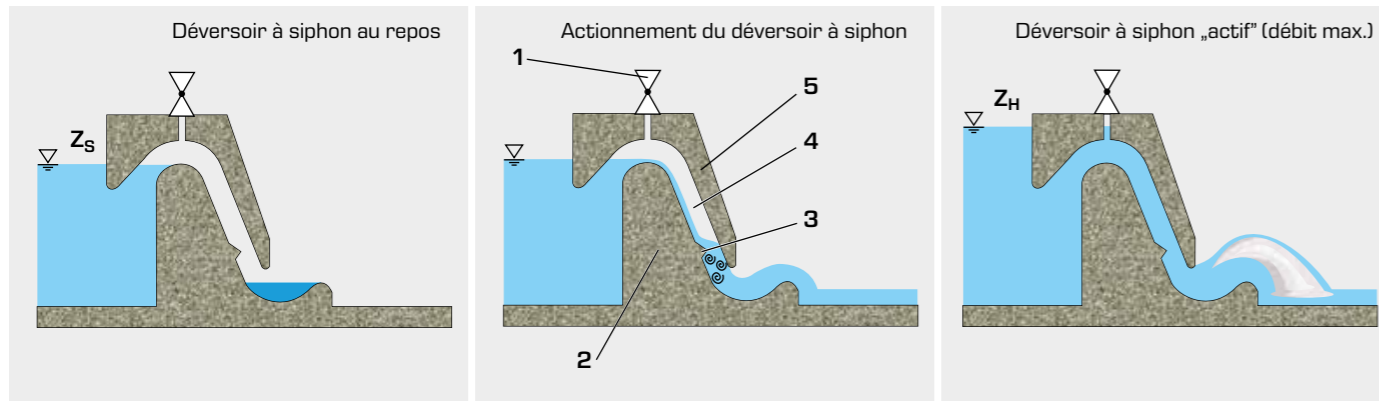
Ouvrages de contrôle: déversoir à siphon

Le déversoir à siphon compte parmi les déversoirs fixes. Le principe hydraulique du siphon est représenté dans les illustrations, le montrant par exemple dans le cas de son utilisation comme évacuateur de crue.

Dès que le niveau de l'eau du lac artificiel monte juste au-dessus de la crête de déversoir du corps de barrage, le siphon se déclenche, ce qui entraîne une brève chute libre. En cas de légère augmentation du niveau de l'eau, et donc de légère hausse du débit, le jet d'eau est conduit par le nez d'amorçage en direction du recouvrement de siphon. Cela entraîne une évacuation par le tuyau de siphon, et donc un écoulement en charge dans le conduit entièrement traversé. Cet écoulement en charge a une capacité d'évacuation élevée qui augmente à peine lorsque le niveau de l'eau continue d'augmenter.

Lorsque le niveau de l'eau du lac artificiel redescend au point qu'il passe en dessous du bord de la lèvres d'entrée, de l'air est aspiré dans le siphon et le siphon est aéré. Ce qui interrompt brusquement l'écoulement d'eau.

Un dispositif d'aération complémentaire permet d'interrompre le débit à tout moment. Les déversoirs à siphon de GUNT disposent d'une aération permettant de comparer le fonctionnement ou la capacité d'évacuation du déversoir à siphon avec et sans aération. Les possibilités d'ajustage des déversoirs à siphon sont limitées et ils ne peuvent pas être surchargés. Du fait de leur capacité d'évacuation élevée, ils étaient autrefois souvent utilisés dans les barrages pour l'évacuation de crues.

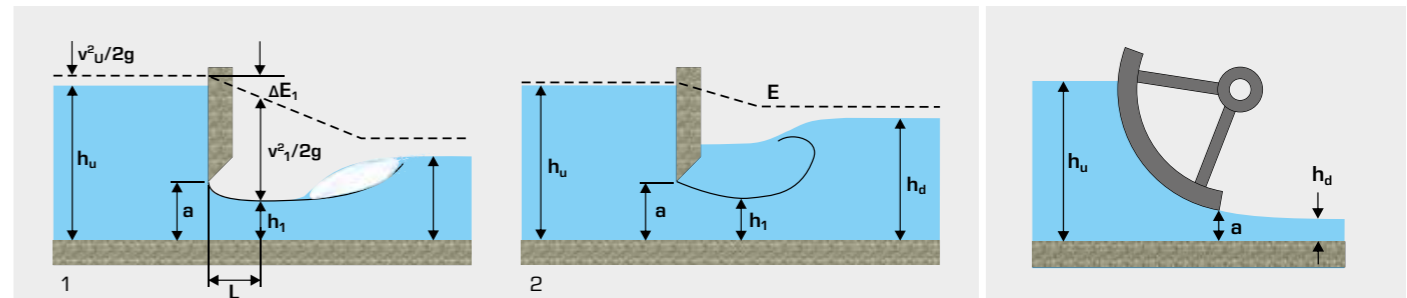


Principe d'un déversoir à siphon

1 aération maniable, 2 corps de déversoir, 3 nez d'amorçage, 4 tuyau de siphon, 5 recouvrement de siphon;
Z_s niveau maximal de la retenue, Z_H niveau maximal de la retenue le plus élevé

Déversoir à siphon
HM162.36

Ouvrages de contrôle: écoulement sous des vannes



Écoulement en dessous d'une vanne plane

1 écoulement dénoyé, 2 écoulement noyé;
h_u profondeur de l'eau en amont, a hauteur de l'ouverture de vanne,
h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval, h₁ profondeur minimale de l'écoulement,
L position de la profondeur minimale de l'écoulement, E charge spécifique, ΔE perte de charge

Écoulement en dessous d'une vanne radiale

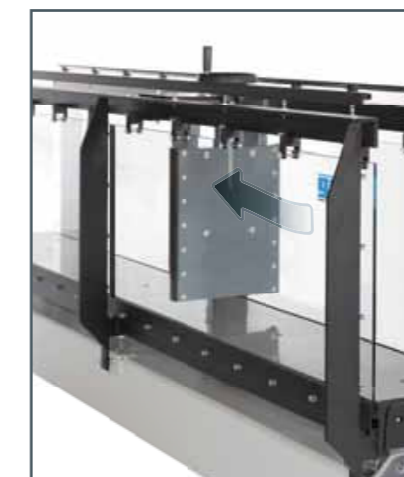
h_u profondeur de l'eau en amont,
a hauteur de l'ouverture de vanne,
h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval

Pour les vannes il y a, comme pour les déversoirs submergés, un **écoulement dénoyé** et un **écoulement noyé**. Une contraction de jet a lieu lors de l'écoulement, que l'on appelle "vena contracta" (profondeur minimale de l'écoulement h₁). On a un **écoulement dénoyé** tant que l'écoulement s'écoule sans perturbation en dessous de la vanne et qu'il n'y a pas de retenue de l'eau en aval au niveau de la vanne. Dans le cas de l'écoulement dénoyé, on a un écoulement supercritique juste après la vanne.

Par analogie avec l'écoulement par des déversoirs, on calcule le débit d'écoulement dénoyé Q à partir de l'équation de Bernoulli, du principe de conservation de l'impulsion et de l'équation de continuité

$$Q = \mu b a \sqrt{2gh_u}$$

avec μ = coefficient de débit, b = largeur de vanne, a = hauteur de l'ouverture de vanne.



Vanne plane HM162.29



Vanne radiale HM162.40

Les vannes sont des ouvrages de contrôle mobiles, ce qui signifie que l'hauteur de l'ouverture de vanne a et donc le débit Q est modifié et ajusté aux besoins réels. Il existe dans la pratique des diagrammes caractéristiques sur lesquels on peut lire le débit Q (à des profondeurs de l'eau en amont et de l'eau en aval h_u et h_d et pour une hauteur de l'ouverture de vanne a donnés).

La vanne radiale circulaire est une vanne très couramment utilisée pour contrôler le débit. La vanne radiale est souvent placée sur la crête de déversoir d'un ouvrage de contrôle. L'écoulement ne passe pas seulement en dessous de la vanne radiale, il peut aussi passer par-dessus lorsque la vanne radiale est positionnée à l'intérieur d'un canal (déversoir radial).

Les canaux d'essai de GUNT permettent l'installation et l'étude d'une vanne plane plate et d'une vanne radiale.

Connaissances de base Écoulement dans des canaux

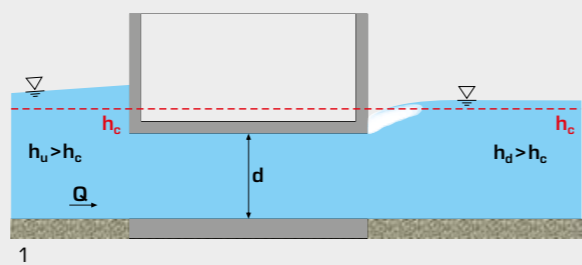
Passage

Les passages font partie des ouvrages de croisement dans les eaux courantes et permettent le passage de l'eau. Il peut s'agir d'un tuyau qui passe en dessous d'une route, permettant ainsi à l'eau de la traverser.

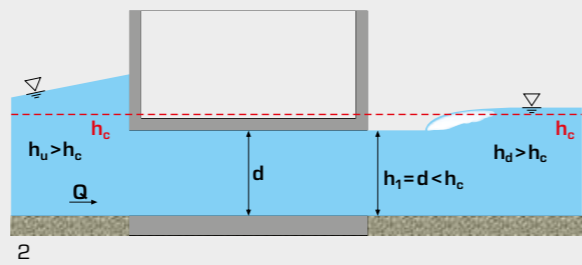
Le passage peut être, selon le débit rencontré, partiellement rempli ou entièrement traversé. Le passage partiellement rempli avec surface libre est traité comme un canal. Le passage entièrement traversé et le passage sur lequel l'entrée est complètement submergée font eux partie des ouvrages de contrôle. On a ici une limitation du débit. On peut aussi avoir une association des deux états, si bien que le passage est en partie entièrement traversé, et en partie partiellement rempli.

Les passages ne sont pas favorables à l'hydraulique pour différentes raisons: ils entraînent des pertes d'écoulement, sont sujets aux "engorgements" (poubelle, sédiments) peuvent entraîner un affouillement à l'entrée et à la sortie et ont souvent des dimensions insuffisantes en cas de crues. Ils sont en plus difficiles à franchir pour les créatures aquatiques. Les ponts sont une meilleure alternative sur le plan hydraulique, mais sont beaucoup plus onéreux.

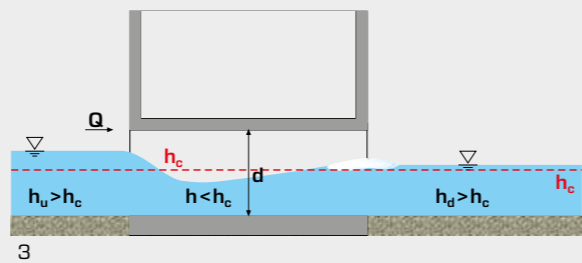
Type de débit 1
passage entièrement traversé, avant et après le passage $Fr < 1$; h_u profondeur de l'eau en amont, h_c profondeur critique, Q débit, d diamètre du passage, h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval



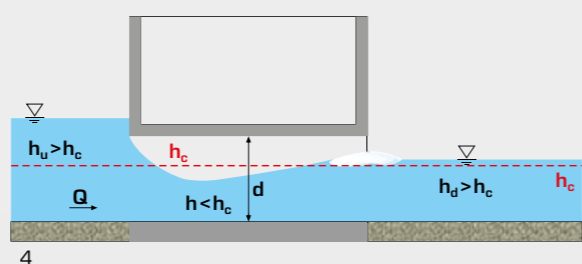
Type de débit 2
passage entièrement traversé, avant le passage $Fr < 1$; juste après le passage $Fr > 1$



Type de débit 3
passage partiellement rempli, ici avec changement d'écoulement à l'entrée et après le passage; également possible: débit continu avec $Fr < 1$ ou $Fr > 1$



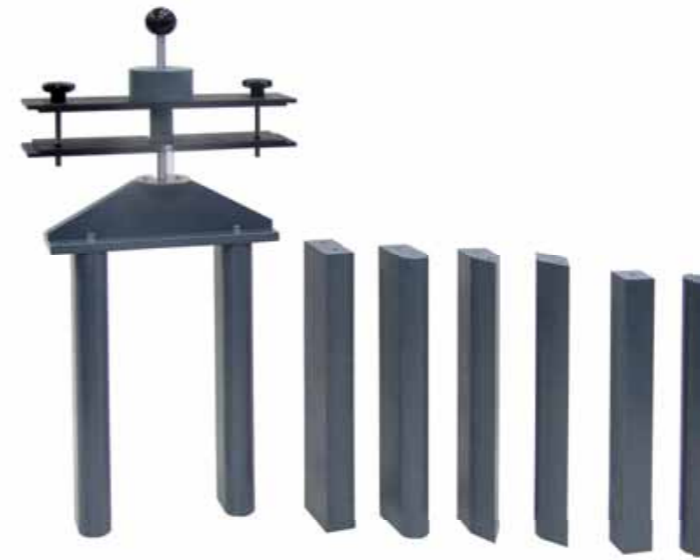
Type de débit 4
passage enterré épanché avec contrôle de l'écoulement; changement d'écoulement possible même dans le passage, de manière à ce que le passage soit en partie entièrement traversé



Passage HM162.45

Pertes locales dans des canaux ouverts

Des pertes locales apparaissent au niveau de modifications de la coupe transversale (étranglement, seuils, canaux jaugeurs), modifications de direction et obstacles. Les piles pour les ponts ou les déversoirs constituent un exemple d'obstacles dans les canaux. Les piles rétrécissent la section d'écoulement. Ce qui peut entraîner une retenue.



Jeu de piles HM162.46

D'un point de vue hydraulique, on compte quatre cas généraux de piles pour lesquels on considère à des fins d'évaluation le comportement d'écoulement sans obstacles, autrement dit l'écoulement normal. Les quatre cas généraux sont les suivants:

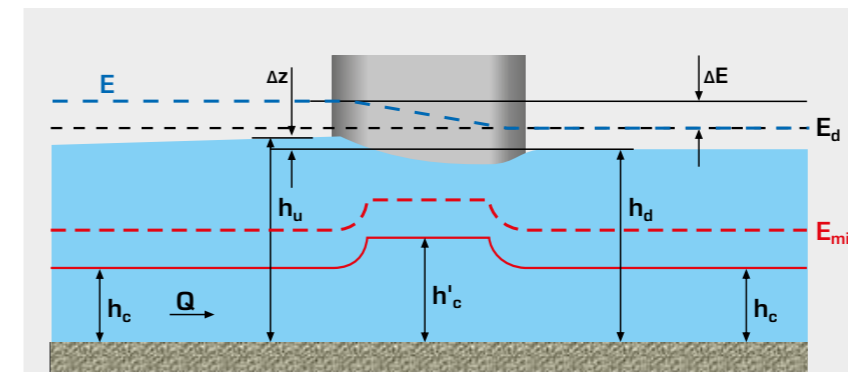
- écoulement sous-critique avec étranglement de section faible ou important
- écoulement supercritique avec étranglement de section faible ou important

Une retenue non négligeable et donc un éventuel changement d'écoulement avant la pile apparaît lorsque la charge spécifique E du débit sans perturbations Q est inférieure à la charge spécifique minimum nécessaire E_{min} pour assurer le débit complet Q . Lorsque la largeur d'écoulement b_{rest} du canal diminue du fait d'obstacles, E_{min} augmente (voir Illustrations).

Pour le canal rectangulaire avec coupe transversale large, on applique la relation:

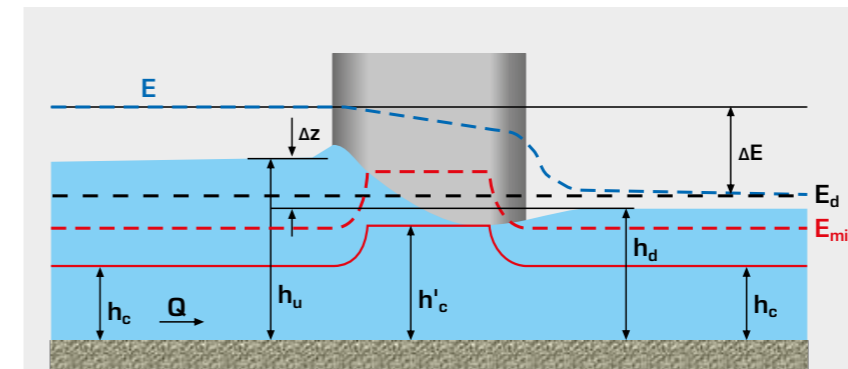
$$E_{min} = 1,5^3 \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2_{rest}}}$$

Les piles avec profil rectangulaire, avec profil arrondi et avec profil pointu sont étudiées dans les canaux d'essai de GUNT.



Écoulement sur piles arrondies sans changement d'écoulement

E charge spécifique avec piles,
 Q débit,
 E_d charge spécifique sans perturbations,
 E_{min} charge spécifique minimale requise,
 h_d profondeur d'écoulement de l'eau en aval (écoulement normal),
 h_u profondeur de l'eau en amont avec piles,
 h_c profondeur critique sans perturbations,
 h'_c profondeur critique avec piles,
 Δz retenue à piles,
 ΔE perte de charge



Écoulement sur piles arrondies avec changement d'écoulement

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Procédés de mesure du débit

Les procédés les plus couramment utilisés pour déterminer le débit dans un canal ouvert sont les **canaux jaugeurs** et les **déversoirs de mesure**. Pour les deux procédés, il existe une dépendance fixe entre la profondeur de l'écoulement h et le débit Q .

Canaux jaugeurs

Les **canaux Venturi** de mesure sont des canaux de forme spéciale présentant un rétrécissement latéral défini, et un fond partiellement profilé. Le rétrécissement retient le débit Q . La retenue assure la formation d'un écoulement sous-critique dans le canal. L'accélération et le changement d'écoulement de sous-critique à supercritique ont lieu dans le rétrécissement. Dans la section la plus étroite, on a un écoulement critique. Un ressaut se produit dans l'élargissement du canal Venturi. Le débit Q est calculé à partir de la profondeur de l'eau en amont h_u .

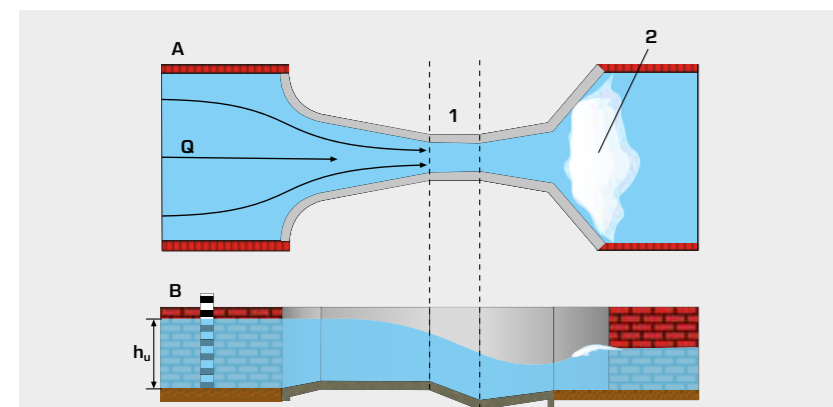
Les canaux Venturi de GUNT ont un fond plat.

Afin que la mesure dans le canal Venturi ne soit pas faussée, il faut avoir un écoulement dénoyé et la profondeur de l'eau en amont h_u ne doit pas être influencée par l'eau en aval.



Canal Parshall
HM162.55

Les **canaux Parshall** sont des canaux Venturi ayant un fond profilé. Les rapports entre rétrécissement et élargissement sont définis. Les canaux Parshall sont disponibles dans le commerce accompagnés d'une courbe de débit (débit Q en fonction de la profondeur de l'eau en amont h_u). Ils sont très répandus en Amérique du Nord.



A vue de haut du canal Venturi ou du canal Parshall,
B vue latérale du canal Parshall;
1 section la plus étroite, **2** ressaut; h_u profondeur de l'eau en amont, Q débit



Canal Venturi
HM162.51



Canal trapézoïdal HM162.63

Les **canaux trapézoïdaux** font également partie des canaux jaugeurs. La section d'écoulement est triangulaire ou trapézoïdale avec des parois lisses. Comparé aux canaux Parshall, ils présentent souvent une perte de hauteur de pression inférieure pour un débit identique et sont mieux adaptés aux faibles débits.

Les canaux jaugeurs sont principalement utilisés dans les stations d'épuration, car ils sont bien adaptés aux eaux polluées. Leur maintenance ne pose aucun problème.

Déversoirs de mesure

Les déversoirs de mesure sont habituellement des déversoirs à paroi mince. Leur conception est simple, ils prennent peu de place et sont faciles à assembler.

Les déversoirs de mesure sont utilisés pour déterminer le débit Q . Le débit est mesuré en enregistrant la hauteur h_o avant le déversoir. Une distance minimale de $3h_o$ est requise entre le point de mesure et le déversoir. Pour la conversion de la hauteur h_o en débit Q , on utilise des formules d'approximation qui prennent en compte la géométrie du déversoir de mesure et le coefficient de débit selon Poleni.

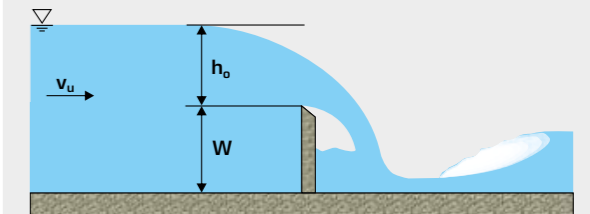
Sur les déversoirs de mesure, on a toujours une nappe dénoyée.

Les déversoirs à paroi mince sont disponibles avec différentes géométries. On a par exemple le:

- **déversoir rectangulaire selon Rehbock**
Utilisation avec des débits relativement uniformes dépassant $50\text{m}^3/\text{h}$, mais précision limitée dans la partie inférieure de la plage de mesure. Le déversoir rectangulaire nécessite une aération.
- **déversoir triangulaire selon Thomson**
Utilisation avec des débits variables ($0,75\text{...}240\text{m}^3/\text{h}$); bonne précision de mesure pour les faibles débits.
- **déversoir en trapèze selon Cipoletti**
Utilisation avec des débits relativement élevés supérieurs à $125\text{m}^3/\text{h}$.

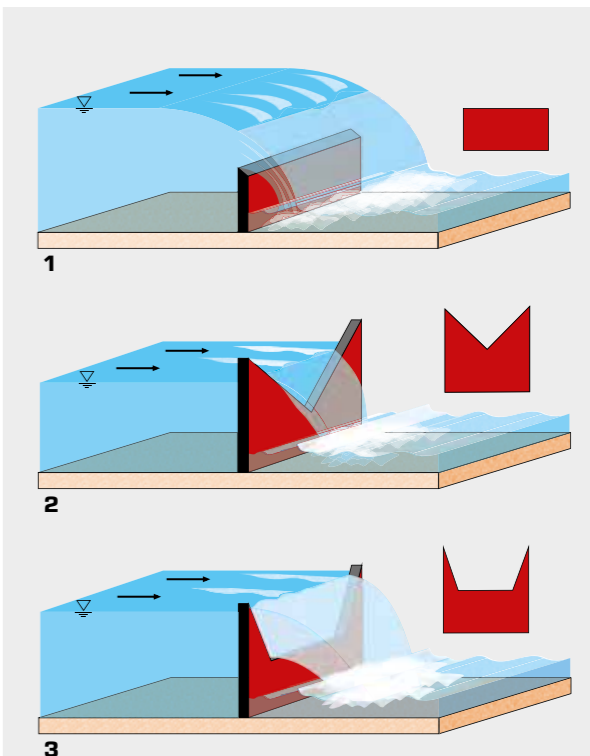


Jeu de déversoirs à paroi mince, quatre types HM162.30



Nappe dénoyée aérée au niveau du déversoir à paroi mince

v_u vitesse dans l'eau en amont,
 h_o hauteur,
 W hauteur du déversoir



Débordement de déversoirs de mesure typiques en vue latérale

- 1** déversoir rectangulaire sans contraction,
- 2** déversoir triangulaire selon Thomson,
- 3** déversoir en trapèze selon Cipoletti

Connaissances de base

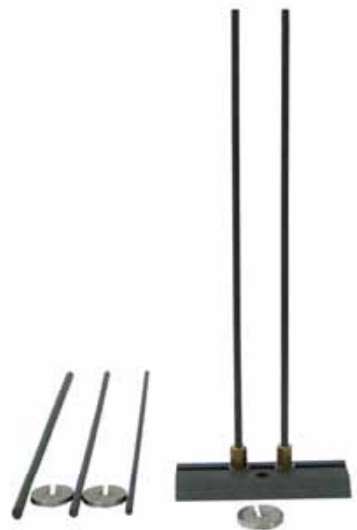
Écoulement dans des canaux

Écoulement non stationnaire: vibrations induites par l'écoulement

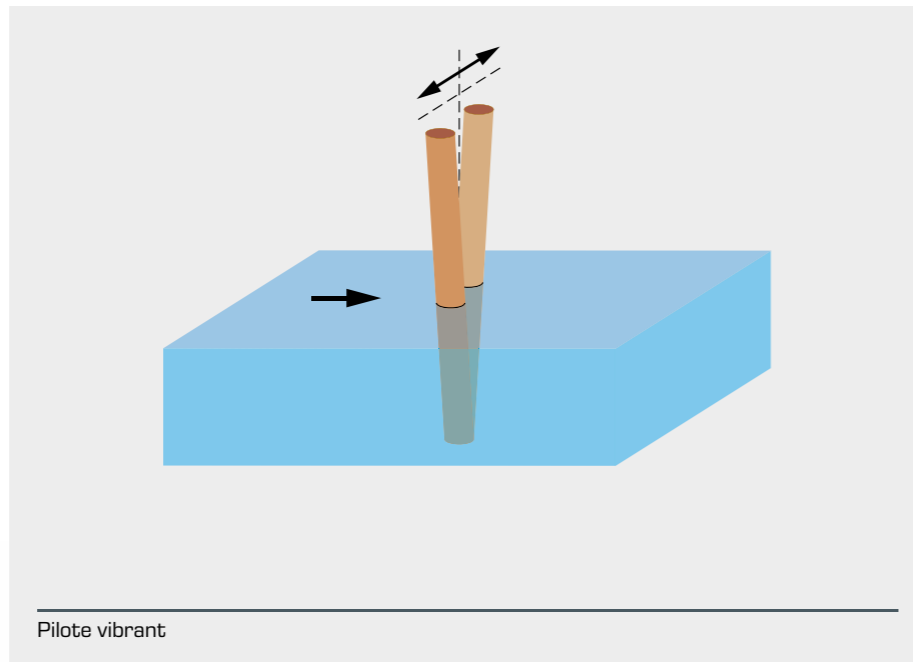
Les jetées ou les plateformes de forage sont en général construites sur des pilotes situés dans l'eau. L'eau en écoulement exerce des forces sur la partie des pilotes se trouvant sous la surface de l'eau, ce qui peut provoquer des oscillations. On fait la distinction entre les **vibrations induites par les tourbillons** et les **vibrations induites par l'écoulement**. Il est important de s'intéresser à ces forces et aux contraintes qu'elles produisent étant donné qu'elles peuvent entraîner une défaillance du composant.

Les vibrations sont le résultat de l'interaction entre le fluide en mouvement et le pilote. Il est possible par exemple que se forme une allée de tourbillons de Karman lors de l'écoulement autour du pilote. Le détachement de ces tourbillons entraîne une modification de la direction de l'écoulement. Dans le pire des cas, la fréquence de détachement des tourbillons correspond à la fréquence propre du pilote.

Le modèle de GUNT "Pilotes vibrants" HM162.61 permet d'observer les vibrations d'un pilote individuel. Il comporte en outre deux piliers parallèles positionnés à la perpendiculaire de l'écoulement et qui se mettent à vibrer sous l'effet de l'écoulement. La distance entre les pilotes est modifiable. Lorsque la distance est insuffisante, on assiste à des vibrations couplées des deux pilotes.



Pilotes vibrants HM 162.61



Pilote vibrant



Transport des sédiments

En plus de l'eau qui s'écoule, on assiste dans pratiquement tous les canaux ouverts à un **transport des sédiments** qui influence le comportement de l'écoulement. Le transport des sédiments est composé du **transport des sédiments en suspension** et du **transport par charriage**. Les matières en suspension sont des matières solides qui sont en suspension dans l'eau et n'ont aucun contact avec le fond. Le charriage est lui un proces-

sus de déplacement des matières solides durant lequel elles restent en contact avec le fond. Le transport par charriage constitue la composante de référence du comportement d'écoulement dans des canaux ouverts. Des sédiments qui se déposent ("atterrissement") ou sont transportés (érosion ou formation d'affouillement) peuvent par exemple modifier la section d'écoulement ou les lignes d'eau. Le transport des sédiments

entraîne également une modification de la structure du lit (formation de rides ou de dunes, modification de la rugosité).

En cas d'écoulement normal, il faut, outre les équations déjà mentionnées, considérer aussi l'équilibre de transport au volume de contrôle - la quantité de sédiments qui quitte le volume de contrôle est-elle la même que celle qui revient à l'alimenter?

Dans les canaux d'essai de GUNT, le transport des sédiments est démontré avec du sable. En plus de l'alimentateur en sédiments situé à l'entrée du canal d'essai, un piège à sédiments est installé au bout du canal d'essai. Selon la vitesse d'écoulement, on observe la formation de rides ou d'une dune mobile. Avec d'autres modèles, il est possible d'observer l'atterrissement contre un déversoir ou la formation d'affouillement sur le bassin d'amortissement.

De manière générale, la thématique du transport des sédiments est toutefois étudiée de manière approfondie dans différents bancs d'essai tels que le HM140 ou le HM168.



Alimentateur en sédiments HM162.73



Piège à sédiments HM162.72 au niveau de l'évacuation du HM162



Dépôt de sédiments sur des épis de rivière



Atterrissements dans le Rhin

Connaissances de base

Écoulement dans des canaux

Écoulement non stationnaire: vagues

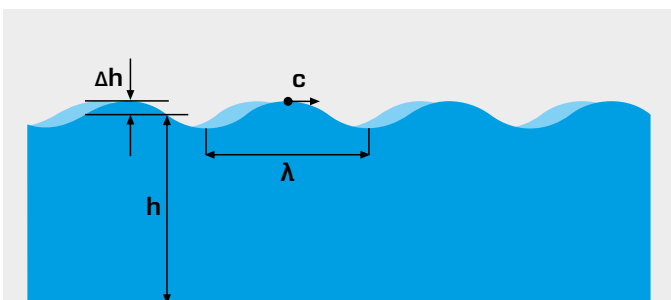
La surface libre de l'eau est "déformée" par le vent (vagues). Il existe une grande diversité de vagues dans la nature (longues ou courtes, brisantes ou lisses, etc.). Les vagues naturelles sont irrégulières, par exemple une vague plate fait suite à une vague élevée (amplitude). À part les vagues produites par le vent, il existe par exemple des vagues de surface dues à une perturbation, des ondes positives ou négatives, et des vagues de Tsunami qui se forment suite à une élévation de l'eau sous l'effet d'un tremblement de terre, d'un glissement de terrain par exemple.

Les vagues transportent de l'énergie, mais pas de masse. Lorsqu'une vague arrive dans de l'eau peu profonde, par exemple à proximité d'une plage, elle est freinée. Le creux d'une vague est freiné plus fortement que la crête d'une lame. C'est pourquoi la crête d'une lame dépasse le creux d'une vague, et la vague se brise.

L'étude de la formation et des effets des vagues joue un rôle important pour la navigation, la protection du littoral et pour le dimensionnement des installations offshore (parcs éoliens, plateformes de forage). Dans le cas particulier de la protection du littoral, il s'agit de minimiser la force de destruction des vagues et de diminuer le déplacement de sédiments.

Le générateur de vagues de GUNT produit des vagues harmoniques et périodiques dans les canaux d'essai de GUNT. On peut par exemple observer la réflexion des vagues à l'extrémité du canal. Associé aux simulations de plage, il est possible d'observer et de comparer le comportement de vagues identiques sur des sols différents.

L'accessoire piles HM162.46 permet d'observer l'accumulation autour de piles se trouvant dans le bassin de port ou appartenant à une installation offshore.



Vague périodique

Δh amplitude, h profondeur moyenne,
 c vitesse de propagation de la vague, λ longueur de vague

$$\text{Période de vague } T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c}$$

	Eaux peu profondes	Eaux profondes
Longueur de vague	$\lambda/h > 20$	$\lambda/h < 2$
Vitesse de vague	$c = \sqrt{gh}$	$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$
Chemin des particules	linéaire	circulaire

Générateur de vagues
HM162.41Jeu de plages HM162.80
(plage lisse, plage perméable et plage rugueuse)