

INRAE



Logiciel Cassiopée

version 4.19.1

Documentation utilisateur

13 MAI 2025

DAVID DORCHIES, JEAN-PASCAL AUBRY, MATHIAS CHOUET, FRANÇOIS GRAND

Table des matières

1	Présentation de Cassiopée	10
1.1	Présentation du logiciel Cassiopée	10
1.1.1	Caractéristiques générales	10
1.1.2	Pré-requis - installation	10
1.1.3	Documentation	10
1.1.4	Assistance et signalement de bug	10
1.1.5	Citer Cassiopée	11
1.2	Installation	11
1.2.1	Installation de l'application web progressive Cassiopée	11
1.2.2	Installation de l'application Desktop (obsolète)	12
1.3	Principe de fonctionnement d'un module de calcul	12
1.3.1	Ouvrir un nouveau module de calcul	12
1.3.2	Comment s'opèrent les choix pour effectuer un calcul ou une série de calcul ?	12
1.3.3	Comment faire varier un paramètre pour effectuer une série de calculs	13
1.3.4	Comment lancer un calcul ou une série de calcul	15
1.3.5	Les résultats du calcul	15
1.4	Paramètres de l'application	16
1.5	Liste des raccourcis clavier	17
2	Hydraulique en charge	18
2.1	Perte de charge	18
2.1.1	Perte de charge locale	18
2.1.2	Coefficient de perte de charge linéaire	18
2.1.3	Coefficient de perte de charge de Darcy	18
2.2	Formule de Lechapt et Calmon	19
2.3	Formule de Strickler	19
2.4	Conduite distributrice	20
2.4.1	Hypothèses	20

2.4.2	Développement analytique	20
2.4.3	Application numérique	21
3	Hydraulique à surface libre	22
3.1	Le régime uniforme	22
3.2	Courbe de remous	23
3.3	Cotes amont / aval d'un bief	24
3.4	Section paramétrée	24
3.4.1	Hauteur de berge, débordement et écoulement en charge	25
3.4.2	Largeur au miroir, surface et périmètre mouillé	25
3.4.3	Le rayon hydraulique (m)	26
3.4.4	La vitesse moyenne (m/s)	26
3.4.5	La charge spécifique (m)	26
3.4.6	La perte de charge (m/m)	26
3.4.7	La variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)	26
3.4.8	Le tirant d'eau normal (m)	26
3.4.9	Le Froude	26
3.4.10	Le tirant d'eau critique (m)	27
3.4.11	La charge critique (m)	27
3.4.12	Le tirant d'eau correspondant (m)	27
3.4.13	L'impulsion hydraulique (N)	27
3.4.14	Le tirant d'eau conjugué (m)	28
3.4.15	La force tractrice (Pa)	28
3.5	Pente	28
3.5.1	Définition	28
3.5.2	L'outil "Pente"	28
3.6	Types de sections	29
3.6.1	Section rectangulaire	29
3.6.2	Section circulaire	29
3.6.3	Section trapézoïdale	29
3.6.4	Section parabolique	30
3.7	Formule de Manning-Strickler	30
3.7.1	Définition	30
3.7.2	Tableau de Chow (1959)	30
4	Lois d'ouvrages	34
4.1	Lois d'ouvrages	34

4.1.1	Description du module de calcul	34
4.1.2	Type de jet	34
4.2	Lois de déversoirs dénoyés	35
4.3	Cloisons	36
4.3.1	Ouvrages hydrauliques pouvant constituer la cloison	36
4.4	Equations d'ouvrages	38
4.4.1	Liste des équations d'ouvrages	38
4.4.2	Formule de Kindsvater-Carter et Villemonte	41
4.4.3	Formule de l'orifice noyé	43
4.4.4	Formule de l'orifice dénoyé	44
4.4.5	Formule de la fente noyée	45
4.4.6	Coefficient de débit Cd pour la formule de la fente noyée (passe à bassins à fente verticale)	46
4.4.7	Formule du déversoir noyé (Rajaratnam, 1969)	48
4.4.8	Formule du déversoir dénoyé	48
4.4.9	Formule du déversoir triangulaire	49
4.4.10	Formule du déversoir triangulaire tronqué	50
4.4.11	Cemagref-V : Déversoir / Vanne de fond (pelle faible)	52
4.4.12	Cemagref-D : Déversoir / Orifice (pelle importante)	54
4.4.13	Formules de Cunge 1980	56
4.4.14	Vanne dénoyée	58
4.4.15	Vanne noyée	59
4.4.16	Villemonte 1947	59
5	Passes à bassins	61
5.1	Passes à bassins : Chute	61
5.1.1	Formule	61
5.2	Passes à bassins : Nombre de chutes	61
5.2.1	Formule	61
5.3	Passes à bassins : Puissance dissipée	61
5.4	Passes à bassins : Dimensions	62
5.5	Cloisons	62
5.5.1	Ouvrages hydrauliques pouvant constituer la cloison	63
5.6	Passe à bassins	64
5.6.1	Présentation générale	65
5.6.2	Saisie de la géométrie de la passe	65
5.6.3	Résultats du calcul	66

5.6.4	Session exemple	67
5.7	Pré-barrages	67
5.7.1	Présentation générale	67
5.7.2	Composition du pré-barrage	67
5.7.3	Saisie des paramètres des éléments du pré-barrage	68
5.7.4	Lancement du calcul	68
5.7.5	Visualisation des résultats	68
5.8	Passe « naturelle » à enrochements en rangées périodiques	68
6	Passes à macro-rugosité	70
6.1	Passe à macro-rugosités	70
6.2	Rugosité de fond	71
6.2.1	Références	71
6.3	Calcul du débit d'une passe à macro-rugosité	71
6.3.1	Principe général du calcul	71
6.3.2	Cas submergé	72
6.3.3	Cas émergent	74
6.3.4	Formules utilisées	74
6.3.5	Notations	77
6.3.6	Références	77
6.4	Passe à macro-rugosités complexe	78
6.4.1	Caractéristiques générales	78
6.4.2	Cas du radier incliné	78
6.5	Concentration de blocs	78
6.5.1	Formule	79
6.5.2	Harmonisation	79
6.5.3	Références	79
6.6	Courbe de remous d'une passe à macro-rugosité	80
6.6.1	Principe de fonctionnement	80
6.7	Passe à rugosités de fond	80
6.7.1	Avertissement sur la franchissabilité de l'ouvrage	81
6.7.2	Méthode de calcul	81
6.7.3	Références	82
7	Passes à ralentisseurs	83
7.1	Calage d'une passe à ralentisseurs	83
7.1.1	Calage hydraulique de la passe	83

7.1.2	Calage altimétrique de la passe	83
7.1.3	Génération d'un module de simulation de passe à ralentisseurs	84
7.2	Simulation d'une passe à ralentisseurs	84
7.3	Formules de calcul des passes à ralentisseurs	84
7.3.1	Cote de l'eau à l'amont de la passe Z_1	85
7.3.2	Longueur de la passe	85
7.3.3	Nombre de ralentisseurs N_b	85
7.3.4	Cotes de radier à l'aval Z_{r2} et de déversement à l'aval Z_{d2}	85
7.4	Passe à ralentisseurs plans (Denil)	86
7.4.1	Caractéristiques géométriques	86
7.4.2	Lois hydrauliques issues des abaques	86
7.4.3	Calcul de h_a , h et Q	88
7.4.4	Vitesse débitante	89
7.4.5	Cote de radier amont Z_{r1}	91
7.4.6	Cote d'arase minimale des murs latéraux Z_m	91
7.5	Passe à ralentisseurs "Fatou"	91
7.5.1	Caractéristiques géométriques	91
7.5.2	Lois hydrauliques issues des abaques	91
7.5.3	Calcul de h_a , h et Q	93
7.5.4	Vitesse débitante	94
7.5.5	Cote de radier amont Z_{r1}	96
7.5.6	Cote d'arase minimale des murs latéraux Z_m	96
7.6	Passe à ralentisseurs à fond suractif	96
7.6.1	Lois hydrauliques issues des abaques	97
7.6.2	Calcul de h_a , h et Q	99
7.6.3	Vitesse débitante	99
7.6.4	Cote de radier amont Z_{r1}	100
7.7	Passe à ralentisseurs mixte ou à chevrons	100
7.7.1	Lois hydrauliques issues des abaques	100
7.7.2	Calcul de h_a , h et Q	102
7.7.3	Vitesse débitante	103
7.7.4	Cote de radier amont Z_{r1}	104

8 Vérification des critères de franchissement 105

8.1	Vérification des critères de franchissement	105
8.1.1	Avertissement	105

8.1.2	Principe	105
8.1.3	Espèces prédéfinies	106
8.1.4	Espèces personnalisées	106
8.2	Vérification des critères de franchissement : Passes à bassins	106
8.2.1	Critères	106
8.2.2	Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis	107
8.3	Vérification des critères de franchissement : Passes à ralentisseurs (simulation)	117
8.3.1	Critères	117
8.3.2	Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis	118
8.4	Vérification des critères de franchissement : Passes à macrorugosités	119
8.4.1	Passes à macrorugosités complexes	119
8.4.2	Critères	119
8.4.3	Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis	120
8.5	Vérification des critères de franchissement : Espèces prédéfinies	123
9	Dévalaison	125
9.1	Calcul de la perte de charge sur une grille de prise d'eau	125
9.1.1	Grille conventionnelle	125
9.1.2	Grille orientée	126
9.1.3	Grille inclinée	127
9.1.4	Paramètres	129
9.1.5	Références	132
9.2	Impact de jet	132
9.2.1	Dimensionnement d'un exutoire d'évacuation des poissons	132
9.2.2	Formules utilisées	133
9.2.3	Références	134
10	Outils mathématiques	135
10.1	Opérateurs et fonctions trigonométriques	135
10.1.1	Fonction affine	135
10.1.2	Somme et produit de puissances	135
10.1.3	Fonction trigonométrique	135
10.2	Solveur multimodule	136
11	Méthodes numériques de résolution	137
11.1	Schéma de Runge-Kutta d'ordre 4	137
11.2	Méthode d'Euler explicite	138

11.2.1 Exemple d'application : processus exponentiel	139
11.3 Méthode par intégration de trapèzes	139
11.4 Méthode de Brent	140
11.5 Méthode de Newton	140
12 Historique des versions	141
13 Mentions légales et conditions d'utilisation	164
13.1 Éditeur	164
13.2 Hébergement	164
13.3 Contenus du logiciel Cassiopée	164
13.4 Limitation de responsabilité	165
13.5 Informations personnelles des utilisateurs	165
13.5.1 Données recueillies par Cassiopée	165
13.5.2 Données stockées sur le terminal de l'utilisateur	165
13.6 Liens hypertextes	166
13.6.1 Liens de cassiopee.g-eau.fr vers d'autres sites	166
13.6.2 Établir un lien vers cassiopee.g-eau.fr	166
13.7 Marques et logotypes	166
13.8 Copies d'écran et impressions	166
13.9 Logiciels libres	166
13.9.1 Licence du module de calcul de Cassiopée	166
13.9.2 Outils et bibliothèques tiers	167
Table des figures	168
Liste des tableaux	170

1 Présentation de Cassiopée

1.1 Présentation du logiciel Cassiopée

<https://cassiopee.g-eau.fr>

1.1.1 Caractéristiques générales

Cassiopée est un logiciel consacré à l'hydraulique des rivières avec notamment l'aide au dimensionnement des passes à poissons, l'hydraulique agricole et l'hydraulique à surface libre en général. Il se présente sous la forme de modules de calcul indépendants permettant chacun de résoudre un problème donné. Les modules de calcul peuvent être enchaînés (des paramètres ou des résultats de calcul peuvent être "liés" entre modules) afin de réaliser des enchaînements de calculs complexes. L'utilisateur peut enregistrer localement les modules utilisés afin de les réutiliser ultérieurement.

1.1.2 Pré-requis - installation

Cassiopée ne nécessite aucune installation. Il est disponible en ligne à partir d'un navigateur récent (testé sous Firefox, Edge, Chrome et Chromium) en se rendant à l'adresse suivante : <https://cassiopee.g-eau.fr>.

Des versions hors-ligne sont installables sur les plateformes Windows, Linux, macOS, Android. Voir le détail dans la section installation de la documentation.

1.1.3 Documentation

Télécharger [la documentation au format PDF](#)

Télécharger [le guide de prise en main illustrée au format PDF](#)

1.1.4 Assistance et signalement de bug

Pour être tenu au courant de l'actualité de Cassiopée et bénéficier du réseau d'entraide des utilisateurs de Cassiopée, inscrivez-vous à la liste de diffusion des utilisateurs de Cassiopée : <https://groupes.renater.fr/sympa/subscribe/cassiopee-users>

Les initiés peuvent tester la future version de Cassiopée en cours de développement à l'adresse <https://cassiopee-dev.g-eau.fr> et faire des retours à bug@cassiopee.g-eau.fr.

Pour signaler un bug de l'application, prière d'utiliser le lien "Signaler un problème" présent dans le menu principal de l'application ou écrire directement à bug@cassiopee.g-eau.fr

Pour les questions concernant la conception des ouvrages de franchissements ichtyo-compatibles pour la montaison (passes à bassins, à ralentisseurs, à macro-rugosités) et la dévalaison, adressez-vous à Sylvain Richard, pôle OFB-IMFT Écohydraulique, sylvain.richard@imft.fr.

1.1.5 Citer Cassiopée

Si vous utilisez Cassiopée dans votre travail, n'oubliez pas de mentionner le logiciel en utilisant la référence suivante :

Dorchies, David ; Grand, François ; Chouet, Mathias ; Cassan, Ludovic ; Courret, Dominique ; Richard, Sylvain, 2022, "Cassiopée : tools for designing fish crossing devices for upstream and downstream migrations, and hydraulic calculation tools for environmental and agricultural engineering. Version 4.16.0", <https://doi.org/10.15454/TLO5LX>, Recherche Data Gouv, V1

1.2 Installation

Cassiopée peut être installé pour une utilisation sans connexion internet sous la forme d'un programme exécutable ou d'une Web App progressive (PWA).

1.2.1 Installation de l'application web progressive Cassiopée

Une progressive web app (PWA, application web progressive en français) est une application web qui consiste en des pages ou des sites web, et qui peuvent apparaître à l'utilisateur de la même manière que les applications natives ou les applications mobiles.

Les PWA sont disponibles pour toutes les plateformes (Windows, Linux, MacOS, Android, et iOS) à condition d'avoir un browser compatible :

Plateforme	Chrome/Chromium	Edge	Firefox	Safari
Windows	Oui	Oui	via extension	
Linux	Oui		via extension	
MacOS	Oui		via extension	
Android	Oui		Oui	
iOS				Oui

L'installation se fait directement à partir du navigateur internet à l'adresse <https://cassiopee.g-eau.net> en cliquant sur un bouton situé à droite de la barre d'adresse. L'aspect du bouton peut varier en fonction du navigateur utilisé :

- Installer une PWA avec Chrome/Chromium : <https://support.google.com/chrome/answer/9658361?hl=fr>
- Installer une PWA avec Edge : <https://learn.microsoft.com/fr-fr/microsoft-edge/progressive-web-apps-chromium/ux>
- Installer une PWA (tout browser et plateforme - en anglais) : https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Progressive_web_apps/Installing

Après l'installation, Cassiopée peut être lancé à partir de l'icône de l'application présente sur le bureau.

Les mises à jour sont automatiquement détectées et installées (l'utilisateur est invité à redémarrer Cassiopée après le téléchargement de la mise à jour).

N.B. : même sans passer par la procédure d'installation de la PWA, Cassiopée est disponible dans le navigateur sans connection internet à condition d'avoir été chargé précédemment.

1.2.2 Installation de l'application Desktop (obsolète)

Cassiopée est disponible sous la forme d'un programme exécutable pour les plateformes Windows, Linux et MacOS. Les programmes d'installation sont téléchargeables à l'adresse suivante : <https://cassiopee.g-eau.fr/cassiopee-releases/>

L'installation sous la forme d'une application web progressive (cf. ci-dessus) remplacera définitivement ce mode d'installation dans une prochaine version de Cassiopée.

1.3 Principe de fonctionnement d'un module de calcul

Les modules de calcul de Cassiopée permettent chacun de calculer un paramètre au choix parmi celles intervenant dans une ou plusieurs équations.

1.3.1 Ouvrir un nouveau module de calcul



FIGURE 1.1 – Bandeau supérieur de l'application avec le menu, la liste des modules ouverts et le bouton pour ajouter un nouveau module

La liste des modules est disponible au lancement de l'application. Après avoir ouvert un nouveau module de calcul, cette liste est disponible via le bouton "+" situé dans le bandeau supérieur ou par le menu "≡" puis le lien "Nouveau module de calcul" situé dans le menu.

La liste des modules ouverts apparaît dans le bandeau supérieur et permet de naviguer entre les modules ouverts.

1.3.2 Comment s'opèrent les choix pour effectuer un calcul ou une série de calcul ?

Le module se présente sous la forme d'une série de paramètres intervenant dans la résolution de l'équation du module de calcul.

Pour chacun d'entre eux, l'utilisateur peut au choix :

- Fixer le paramètre (Bouton "FIXÉ") ;
- Faire varier le paramètre afin d'effectuer une série de calcul (Bouton "VARIER")
- Choisir le paramètre qui sera calculé (Bouton "CALCULER") ;

L'interface est conçue pour qu'un paramètre et un seul soit choisi pour le calcul. Les paramètres qui ne peuvent être calculés ne sont pas pourvus du bouton "CALCULER".

Menu icon | PAB : dimen... (Passe à bassins : ...) | PAB : chute (Passe à bassins : ...) | +

Passe à bassins : chute

☒ DONNÉES
 ☐ RÉSULTATS

Nom du module de calcul *

PAB : chute

Cote et chute de la passe

Cote amont (m) *
 2

Cote aval (m) *
 0.5

Chute (m)
 En calcul

FIGURE 1.2 – Paramètres du module de calcul de la chute d’une passe à bassin

1.3.3 Comment faire varier un paramètre pour effectuer une série de calculs

Une série de calculs peut être lancée entre une valeur min et une valeur max pour un pas donné :

Ou pour une liste de valeurs définies :

L’import d’une liste de valeur s’effectue soit par saisie ou copier/coller dans le champ “Liste de valeurs” ou par un fichier texte. Le séparateur décimal est configurable. Tout caractère en dehors des caractères numériques, la lettre “E” et le séparateur décimal sera considéré comme séparateur entre les valeurs. De fait, le séparateur pourra être la virgule, le point-virgule, l’espace, la tabulation, le retour charriot. . .

Le titre de la fenêtre contient le nombre d’occurrences correspondant. Un clic sur le logo

Valeurs multiples (21)

Mode

Min/max

De la valeur minimum *

1

A la valeur maximum *

4

Avec un pas de *

0.15

Stratégie d'extension de la liste de valeurs

Répéter la dernière valeur

Fermer

FIGURE 1.3 – Définition des valeurs min, max et du pas pour un paramètre à varier

Valeurs multiples (4)

Mode

Liste de valeurs

Liste de valeurs

1.5;2;2.1;2.2

Séparateur décimal

. (point)

Importer un fichier

Stratégie d'extension de la liste de valeurs

Répéter la dernière valeur

Annuler

Valider

FIGURE 1.4 – Définition d'une liste de valeurs pour un paramètre à varier

en forme de graphique à droite du titre de la fenêtre permet d'afficher un graphique des variations du paramètre.

Pour le cas où plusieurs paramètres varient et qu'ils n'ont pas le même nombre d'occurrences, il faut définir une stratégie d'extension des listes les plus courtes pour les adapter à la liste du paramètre ayant le plus d'occurrences. Deux stratégies sont disponibles : répéter la dernière valeur ou réutiliser les valeurs de la liste depuis la première occurrence.

1.3.4 Comment lancer un calcul ou une série de calcul

Presser la touche [Entrée] ou cliquer sur le bouton "Calculer" situé au bas de l'écran.

1.3.5 Les résultats du calcul

Pour des paramètres fixés, le panneau de résultat affiche les paramètres fixés et le paramètre calculé ainsi que d'éventuels résultats complémentaires.

Paramètres fixés	Valeurs
Cote amont (m)	2.000
Cote aval (m)	0.500
Chute (m)	1.500

FIGURE 1.5 – Résultat d'un calcul pour des grandeurs fixées

Pour un ou plusieurs paramètres qui varient, le panneau de résultat affiche :

- un graphique d'évolution sur lequel on peut choisir le paramètre à utiliser en abscisse et en ordonnée ;
- un tableau reprenant les paramètres fixés ;
- un tableau reprenant les paramètres qui varient et le paramètre calculé ainsi que les valeurs des éventuels résultats complémentaires.

Les tableaux et graphiques sont pourvus de différentes fonctionnalités :

- un bouton de téléchargement pour récupérer le contenu du tableau au format XLS
- un bouton de téléchargement pour récupérer le graphique affiché au format PNG
- un bouton pour afficher le tableau ou le graphique en plein écran.

Les graphiques sont pourvus d'un zoom accessible en effectuant une sélection à la souris sur le graphique. Le bouton avec la flèche faisant un demi-tour à gauche permet de réinitialiser le zoom à sa valeur d'origine affichant toutes les valeurs disponibles.

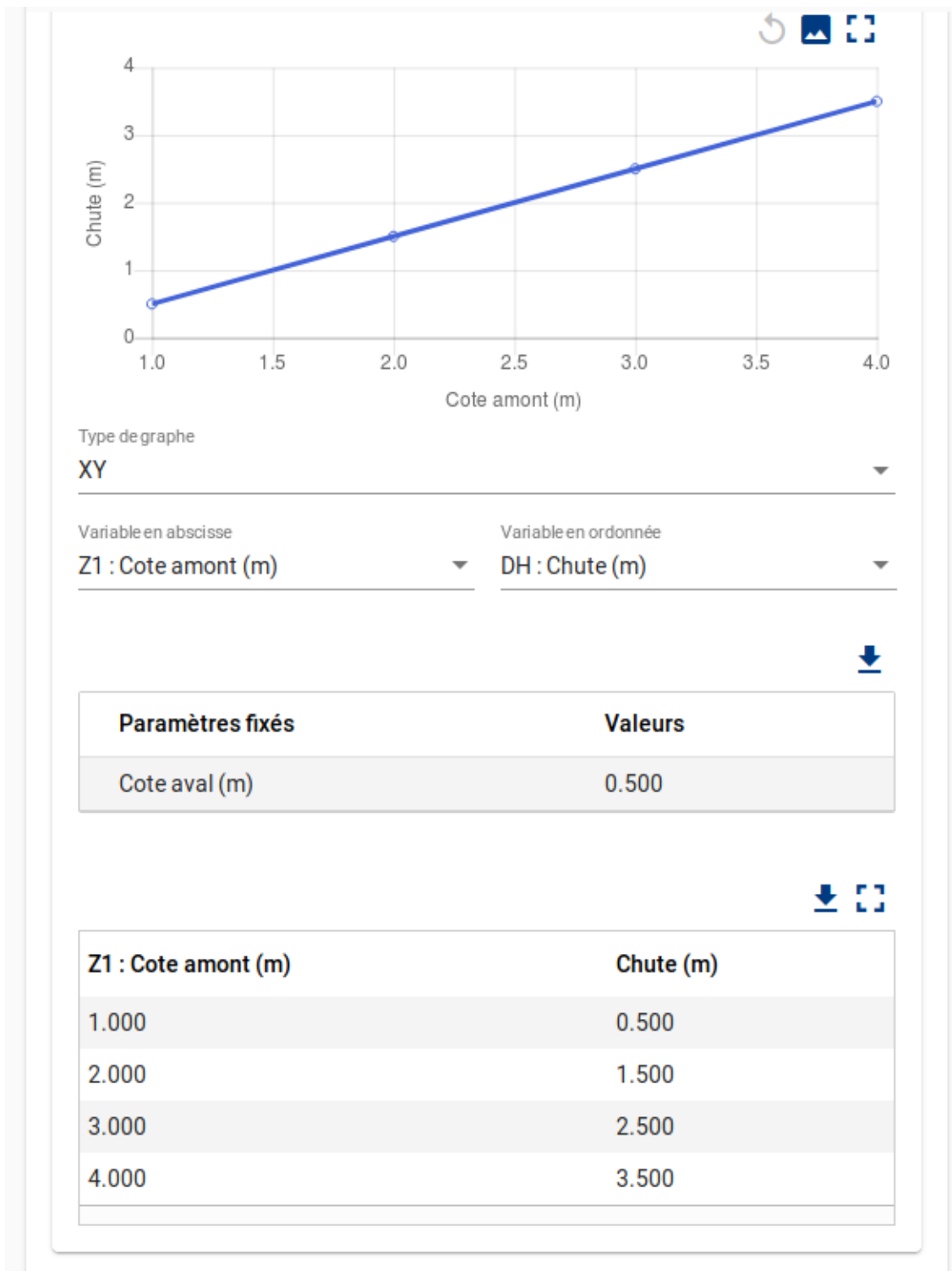


FIGURE 1.6 – Résultat d’une série de calculs pour un paramètre qui varie

1.4 Paramètres de l’application

Accessible depuis le menu latéral gauche, les paramètres de l’application modifiables par l’utilisateur sont les suivants :

- Nombre de décimales affichées : Nombre de décimales affichées pour les résultats des calculs. Pour les nombres proches de zéro affichés en notation scientifique, cette option règle le nombre de chiffres significatifs affichés ;

- Précision de calcul : Précision utilisée pour la convergence du solveur numérique ([Méthode de Brent](#) ou [méthode de Newton](#)) ;
- Solveur : nombre d'itérations maximum ;
- Activer les notifications à l'écran : autorise l'affichage de notifications lors de certaines opérations (avertissement au chargement d'une session, invalidation de calcul. . .) ;
- Activer les raccourcis clavier : autorise l'utilisation des raccourcis clavier (Voir liste des raccourcis disponibles) ;
- Créer des nouveaux modules avec des champs vides (aucune valeur par défaut) : si décoché les paramètres des modules sont pré-remplis avec des valeurs par défaut ;
- Langue : définit la langue des interfaces du logiciel en français ou en anglais.

Le bouton d'enregistrement en haut de la fenêtre permet d'enregistrer les préférences de l'utilisateur dans son navigateur pour les utilisations ultérieures. Le bouton "Reset" permet de restaurer les réglages par défaut de l'application.

1.5 Liste des raccourcis clavier

Pour utiliser les raccourcis clavier, il faut activer l'option dans les paramètres de l'application.

- Alt + S : Enregistre la session courante
- Alt + O : Ouvre une nouvelle session
- Alt + Q : Vide la session courante
- Alt + N : Ajoute un module de calcul à la session courante
- Alt + ↵ : Lance le calcul du module en cours
- Alt + D : Duplique le module en cours
- Alt + W : Ferme le module en cours
- Alt + G : Montre le diagramme des modules
- Alt + 1 : Positionne la page sur la section "Données" du module en cours
- Alt + 2 : Positionne la page sur la section "Résultats" du module en cours
- Alt + 3 : Positionne la page sur la section "Graphique" du module en cours

2 Hydraulique en charge

2.1 Perte de charge

Ce module permet de calculer les pertes de charge dans une conduite circulaire à partir des lois suivantes donnant les pertes de charge linéaires :

- Lechapt et Calmon
- Strickler

Il permet le calcul de la valeur d'une des grandeurs suivantes :

- Débit (m³/s)
- Diamètre du tuyau (m)
- Perte de charge totale (m)
- Longueur du tuyau (m)
- Coefficient de perte de charge locale (singulière) (m)

La perte de charge totale est la somme des pertes de charges linéaires J_{lin} (données par la loi utilisée) et locales J_{loc} dépendantes du coefficient ci-dessus.

2.1.1 Perte de charge locale

$$J_{loc} = K_{loc} \frac{V^2}{2g}$$

Avec :

- K_{loc} : le coefficient de perte de charge locale
- V : la vitesse de l'eau dans la conduite ($V = 4Q/\pi/D^2$)

2.1.2 Coefficient de perte de charge linéaire

$$K_{lin} = \frac{2gJ_{lin}}{V^2}$$

2.1.3 Coefficient de perte de charge de Darcy

$$f_D = \frac{2gJD}{l_T V^2}$$

2.2 Formule de Lechapt et Calmon

La formule de Lechapt et Calmon est basée sur des ajustements de la formule de [Cyril Frank Colebrook](#) :

$$J_{lin} = l_T L \cdot Q^M \cdot D^{-N}$$

Avec :

- J_{lin} : la perte de charge linéaire en m ;
- l_T : la longueur du tuyau en m ;
- Q : le débit en m³/s ;
- D : le diamètre de la conduite en m ;
- L , M et N des coefficients dépendants de la rugosité $\{\epsilon\}$.

L'erreur commise par rapport à la formule de Colebrook est inférieure à 3 % pour des vitesses comprises entre 0,4 et 2 m/s.

Le tableau de correspondance des coefficients est le suivant :

Matériau	ϵ (mm)	L	M	N
Fonte ou acier non revêtus - Béton grossier (eau corrosive)	2	1.863	2	5.33
Fonte ou acier non revêtus - Béton grossier (eau peu corrosive)	1	1.601	1.975	5.25
Fonte ou acier revêtement ciment	0.5	1.40	1.96	5.19
Fonte ou acier revêtement bitume - béton centrifugé	0.25	1.16	1.93	5.11
Acier laminé - béton lisse	0.1	1.10	1.89	5.01
Fonte ou acier revêtement centrifugé	0.05	1.049	1.86	4.93
PVC - polyéthylène	0.025	1.01	1.84	4.88
Tuyau hydrauliquement lisse - $0.05 \leq D \leq 0.2$	0.00	0.916	1.78	4.78
Tuyau hydrauliquement lisse - $0.25 \leq D \leq 1$	0.00	0.971	1.81	4.81

Table : Matériaux et coefficients utilisés dans la formule de Lechapt et Calmon

2.3 Formule de Strickler

Cette loi de perte de charge linéaire est paramétrée par le coefficient de Stricker K_S .

Les autres paramètres sont ceux communs à tous les calculs de perte de charge :

- Q : débit (m³/s)
- D : diamètre du tuyau (m)
- l_T : Longueur du tuyau (m)

$$J_L = \frac{l_T \cdot Q^2}{(K_S \cdot \pi \cdot D^2 / 4)^2 \cdot (D/4)^{4/3}}$$

2.4 Conduite distributrice

Relation analytique pour le calcul direct des pertes de charge en conduite distribuant un débit de façon homogène établi à partir de la formule de Blasius.

2.4.1 Hypothèses

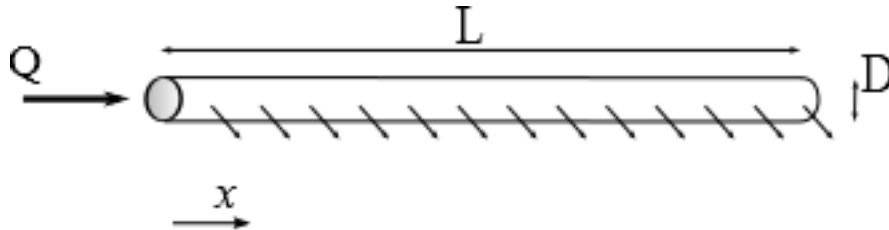


FIGURE 2.1 – Schéma conduite

On suppose une conduite de longueur L , diamètre intérieur D , avec un débit en tête Q . On calcule la perte de charge ΔH entre les 2 extrémités de la conduite. Dans une section de débit q constant, on évalue le coefficient de frottement avec la formule de Blasius, valide pour des nombres de Reynolds modérés pour des parois lisses :

$$\lambda \simeq aRe^{-0.25}$$

2.4.2 Développement analytique

On note x la position depuis l'aval de la conduite. Le débit est supposé varier linéairement avec x , et s'écrit alors :

$$q(x) = Qx/L$$

Notons $S = \pi D^2/4$ la surface intérieure de la conduite. On obtient la perte de charge en intégrant la relation de Darcy-Weisbach :

$$\Delta H = \int_{x=0}^L aRe^{-0.25} \frac{u^2(x)}{2gD} dx$$

Notons ν la viscosité cinématique. On remplace alors Re par uD/ν , ce qui donne

$$\Delta H = \int_{x=0}^L au(x)^{-0.25} D^{-0.25} \nu^{0.25} \frac{u^2(x)}{2gD} dx$$

En réarrangeant, on obtient :

$$\Delta H = \int_{x=0}^L a\nu^{0.25} \frac{u^{1.75}(x)}{2gD^{1.25}} dx$$

Utilisons l'équation du débit pour faire apparaître le débit ($u(x) = q(x)/S$) :

$$\Delta H = \int_{x=0}^L a\nu^{0.25} \frac{(Qx/(LS))^{1.75}}{2gD^{1.25}} dx$$

puis le diamètre D :

$$\Delta H = \int_{x=0}^L a\nu^{0.25} \frac{(4Qx/(L\pi D^2))^{1.75}}{2gD^{1.25}} dx$$

On réarrange pour obtenir

$$\Delta H = a\nu^{0.25} \frac{(4/\pi)^{1.75} Q^{1.75}}{2gD^{4.75}} \int_{x=0}^L (x/L)^{1.75} dx$$

En intégrant, on obtient

$$\Delta H = a\nu^{0.25} \frac{(4/\pi)^{1.75} Q^{1.75}}{2gD^{4.75}} \frac{L}{2.75}$$

$$\Delta H = a\nu^{0.25} \frac{4^{1.75}}{5.5g\pi^{1.75}} \frac{Q^{1.75} L}{D^{4.75}}$$

2.4.3 Application numérique

Pour une eau à 20 °C : $\nu \simeq 10^{-6}$ m²/s, ce qui donne

$$\Delta H = 0.323 \cdot 10^{-3} \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} L$$

avec ΔH en mètres.

Pour une eau à 50 °C, $\nu \simeq 0.556 \cdot 10^{-6}$ m²/s, ce qui implique que la perte de charge est réduite d'environ 14%, soit

$$\Delta H = 0.28 \cdot 10^{-3} \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} L$$

3 Hydraulique à surface libre

3.1 Le régime uniforme

Le régime uniforme se caractérise par une hauteur d'eau appelée hauteur normale. La hauteur normale est atteinte quand la ligne d'eau est parallèle au fond, la charge est alors elle-même parallèle à la ligne d'eau et donc la perte de charge est égale à la pente du fond : $I_f = J$

Avec :

- I_f : la pente du fond en m/m
- J : la perte de charge en m/m

La perte de charge $\{J\}$ est ici calculée avec la formule de Manning-Strickler :

$$J = \frac{U^2}{K^2 R^{4/3}} = \frac{Q^2}{S^2 K^2 R^{4/3}}$$

Avec :

- K : le coefficient de Strickler en m^{1/3}/s

En régime uniforme, on obtient la formule :

$$Q = K R^{2/3} S \sqrt{I_f}$$

A partir de laquelle, on peut calculer analytiquement le débit Q , la pente I_f et le Strickler K analytiquement.

Pour calculer la hauteur normale h_n , on peut résoudre $f(h_n) = Q - K R^{2/3} S \sqrt{I_f} = 0$ en utilisant la méthode de Newton :

$$h_{k+1} = h_k - \frac{f(h_k)}{f'(h_k)}$$

avec :

- $f(h_k) = Q - K R^{2/3} S \sqrt{I_f}$
- $f'(h_k) = -K \sqrt{I_f} (\frac{2}{3} R' R^{-1/3} S + R^{2/3} S')$

Pour calculer les paramètres géométriques de la section, le module de calcul utilise l'équation de calcul du débit et résout le problème par dichotomie.

3.2 Courbe de remous

Le calcul de la courbe de remous fait intervenir l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_f - J(h)}{1 - F^2(h)}$$

où I_f est la pente d'un canal, J la formule nous donnant la perte de charge locale (dépendant la hauteur d'eau), y désigne ici la hauteur d'eau.

On donne ainsi, pour un canal rectangulaire de largeur b et coefficient de Strickler K :

$$J = \frac{Q^2(b + 2y)^{4/3}}{K^2 b^{10/3} y^{10/3}}$$

et

$$F^2 = \frac{Q^2}{gb^2 y^3}$$

L'intégration de l'équation pourra se faire par l'une des méthodes suivantes : Runge-Kutta 4, Euler explicite, intégration de trapèzes.

En fonction du régime d'écoulement, le calcul pourra s'effectuer :

- de l'aval vers l'amont pour le régime fluvial avec définition d'une condition limite aval
- de l'amont vers l'aval pour le régime torrentiel avec définition d'une condition limite amont

Si on prend l'exemple d'un canal rectangulaire, l'exemple de code scilab proposé pour la résolution d'équation différentielle ordinaire est modifié comme suit :

```
b=0.3;
K=50;
If=0.005;
Q=0.01;
function z=DQ(y);
    z=Q-K*(b*y)^(5/3)/(b+2*y)^(2/3)*sqrt(If);
endfunction
yn=fsolve(0.5,DQ);
tmax=0;
t0=10;
dt=-0.5;
function z=f(y,t);
    z=(If-Q^2*(b+2*y)^(4/3)/(K^2*(b*y)^(10/3)))/(1-Q^2/(9.81*b^2*y^3));
endfunction
y0=0.12;
```

ce qui nous donne la profondeur normale, et le tracé de la ligne d'eau. En fonction de la méthode numérique utilisée, on peut avoir de grosses erreurs dans le cas d'une courbe de remous de type F2 (condition aval sous la hauteur normale), car les pentes de ligne d'eau

sont beaucoup plus fortes, et donc beaucoup plus sujettes aux erreurs liées à l'interpolation linéaire. On en déduit donc que d'une part le choix de la méthode de résolution est important, d'autre part qu'il est essentiel d'avoir un regard critique sur les solutions (avec une interprétation des processus qu'on cherche à modéliser).

3.3 Cotes amont / aval d'un bief

Ce module basé sur les équations du module de calcul des courbes de remous permet de calculer :

- La cote de l'eau à l'amont d'un bief d'une courbe de remous fluviale
- La cote de l'eau à l'aval d'un bief d'une courbe de remous torrentielle
- Le débit permettant de relier les cotes de l'eau amont et aval d'une courbe de remous fluviale ou torrentielle.

Le régime choisi sur le type de ligne d'eau détermine si le calcul s'effectue de l'aval vers l'amont (régime fluvial) et de l'amont vers l'aval (régime torrentiel).

Ce module de calcul est particulièrement utile pour calculer la ligne d'eau d'un enchaînement de ouvrages hydrauliques ou de biefs (Voir l'exemple type "Débit d'un chenal avec ouvrages").

3.4 Section paramétrée

Ce module calcule les grandeurs hydrauliques associées à :

- une section ayant une forme géométrique définie (Voir les types de section gérées par Cassiopée)
- un tirant d'eau y en m
- un débit Q en m³/s
- une pente du fond I_f en m/m
- une rugosité exprimée avec le coefficient de Strickler K en m^{1/3}/s

Les grandeurs hydrauliques calculées sont :

- La largeur au miroir (m)
- Le périmètre mouillé (m)
- La surface hydraulique (m²)
- Le rayon hydraulique (m)
- La vitesse moyenne (m/s)
- La charge spécifique (m)
- La perte de charge (m)
- La variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)
- Le tirant d'eau normal (m)
- Le froude
- Le tirant d'eau critique (m)
- La charge critique (m)
- Le tirant d'eau correspondant (m)

- L'impulsion (N)
- Le tirant d'eau conjugué
- La force tractrice (Pa)

3.4.1 Hauteur de berge, débordement et écoulement en charge

Les sections sont toutes pourvues d'une hauteur de berge qui intervient à trois niveaux dans les outils de calcul d'hydraulique à surface libre :

- Elle permet de définir si le tirant d'eau calculé déborde de la section
- Au delà de cette hauteur de berge les calculs hydrauliques simulent un écoulement entre deux murs verticaux. Par exemple, on pourra ainsi modéliser une conduite semi-circulaire en définissant une hauteur de berge égale au rayon de la conduite.
- Pour une conduite circulaire, une hauteur de berge supérieure ou égale au diamètre de la conduite permet de modéliser une conduite fermée. Si la hauteur d'eau dépasse le diamètre de la conduite, les calculs hydrauliques simulent un écoulement en charge à l'aide de la technique de la fente de Preissmann.

3.4.2 Largeur au miroir, surface et périmètre mouillé

Voir la page dédiée pour les paramètres propres à chaque type de section

3.4.2.1 Section rectangulaire

- Largeur au miroir : $B = L$
- Surface : $S = L.y$
- Périmètre : $P = L + 2y$

3.4.2.2 Section trapézoïdale

- Largeur au miroir : $B = L + 2.m.y$
- Surface : $S = (L + m.y)y$
- Périmètre : $P = L + 2y\sqrt{1 + m^2}$

3.4.2.3 Section circulaire

- Largeur au miroir : $B = D \sin \theta$
- Surface : $S = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta)$
- Périmètre : $P = D \cdot \theta$

3.4.2.4 Section parabolique

- Largeur au miroir : $B = \frac{B_b}{y_b^k} y^k$
- Surface : $S = \frac{B_b}{y_b^k} \frac{y^{k+1}}{k+1}$
- Périmètre : $P = 2 \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{n^2} + \frac{1}{4} \left(B \left(\frac{i.y}{n} \right) - B \left(\frac{(i-1).y}{n} \right) \right)^2}$ pour n suffisamment grand

3.4.3 Le rayon hydraulique (m)

$$R = S/P$$

3.4.4 La vitesse moyenne (m/s)

$$U = Q/S$$

3.4.5 La charge spécifique (m)

$$H(y) = y + \frac{U^2}{2g}$$

3.4.6 La perte de charge (m/m)

Cassiopée utilise la formule de Manning Strickler :

$$J = \frac{U^2}{K^2 R^{4/3}} = \frac{Q^2}{S^2 K^2 R^{4/3}}$$

3.4.7 La variation linéaire de l'énergie spécifique (m/m)

$$\Delta E_s = I_f - J$$

3.4.8 Le tirant d'eau normal (m)

Voir le calcul du régime uniforme.

3.4.9 Le Froude

Le nombre de Froude exprime le rapport entre la vitesse moyenne du fluide et la célérité des ondes de surface c .

$$c = \sqrt{\frac{gS}{B}}$$

$$Fr = \frac{U}{c} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gS^3}}$$

3.4.10 Le tirant d'eau critique (m)

La hauteur critique est atteinte quand la vitesse moyenne de déplacement du fluide est égale à la célérité des ondes à la surface de l'eau.

La hauteur critique est donc atteinte quand le nombre de Froude $Fr = 1$.

Pour une section quelconque, on calcule la hauteur critique y_c en résolvant $f(y_c) = Fr^2 - 1 = 0$

On utilise la méthode de Newton en posant $y_{k+1} = y_k - \frac{f(y_k)}{f'(y_k)}$ avec : $f(y_k) = \frac{Q^2 B}{g S^3} - 1$ -
 $f'(y_k) = \frac{Q^2}{g} \frac{B' \cdot S - 3BS'}{S^4}$

3.4.11 La charge critique (m)

C'est la charge calculée pour un tirant d'eau égal au tirant d'eau critique $H_c = H(y_c)$.

3.4.12 Le tirant d'eau correspondant (m)

Pour un tirant d'eau fluvial (respectivement torrentiel) y , le tirant correspondant est le tirant d'eau torrentiel (respectivement fluvial) pour lequel $H(y) = H(y_{cor})$.

3.4.13 L'impulsion hydraulique (N)

L'impulsion I est la somme de la quantité de mouvement et de la résultante de la force de pression dans une section :

$$I = \rho Q U + \rho g S y_g$$

Avec :

- ρ : la masse volumique de l'eau (kg/m³)
- y_g : la distance du centre de gravité de la section à la surface libre (m)

La distance du centre de gravité de la section à la surface libre y_g peut se retrouver à partir de la formule :

$$S \cdot y_g = \int_0^y (y - z) B(z) dz$$

Avec y le tirant d'eau et $B(z)$ la largeur au miroir pour un tirant d'eau z

Les formules de $S \cdot y_g$ pour les différentes formes de section sont :

- section rectangulaire : $S \cdot y_g = \frac{L \cdot y^2}{2}$
- section trapézoïdale : $S \cdot y_g = \left(\frac{L}{2} + \frac{m \cdot y}{3} \right) y^2$
- section circulaire : $S \cdot y_g = \frac{D^3}{8} \left(\sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} - \theta \cos \theta \right)$
- section parabolique : $S \cdot y_g = \frac{B_b \cdot y^{k+2}}{y_b^k (k+1)(k+2)}$

3.4.14 Le tirant d'eau conjugué (m)

Pour un tirant d'eau fluvial (respectivement torrentiel) y , le tirant conjugué est le tirant d'eau torrentiel (respectivement fluvial) pour lequel $I(y) = I(y_{con})$.

3.4.15 La force tractrice (Pa)

$$\tau_0 = \rho g R J$$

3.5 Pente

3.5.1 Définition

La définition de la pente utilisée dans tous les modules de Cassiopée est celle de la pente topographique :

La pente topographique est la tangente de l'inclinaison entre deux points d'un terrain, donc de son angle vis-à-vis de l'horizontale. C'est donc le rapport entre la différence d'altitudes entre les deux points et la distance horizontale, cartographique, entre ces deux points. (Source: Wikipédia)

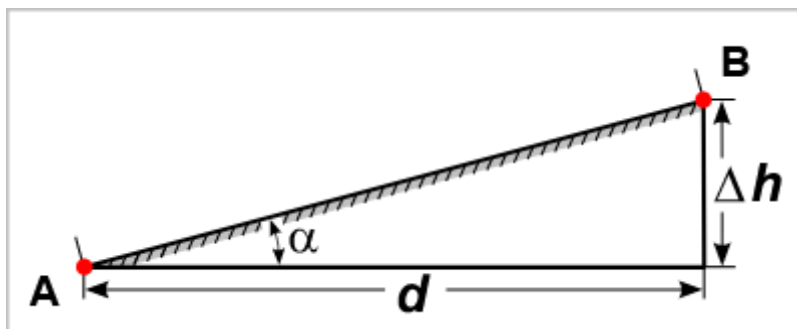


FIGURE 3.1 – Schéma en coupe longitudinale d'un tronçon rectiligne

La pente (I) en m/m utilisée dans les modules de Cassiopée vaut alors :

$$I = \Delta h / d = \tan(\alpha)$$

Important :

Tous les modules de calcul considère une pente descendante positive à l'exception du module "Impact de jet" où une pente positive sera considérée comme montante et inversement. Pour inverser la pente dans une suite de calcul de modules liés, utiliser le module "fonction affine" avec $a = -1$ et $b = 0$.

3.5.2 L'outil "Pente"

Cet outil permet de calculer la valeur manquante des quatre grandeurs :

- la cote amont (Z_1) en m ;
- la cote aval (Z_2) en m ;
- la longueur (d) en m ;
- la pente (I) en m/m, avec $I = \frac{(Z_1 - Z_2)}{d}$.

3.6 Types de sections

3.6.1 Section rectangulaire

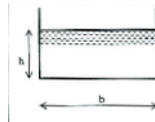


FIGURE 3.2 – Section rectangulaire

La section rectangulaire se caractérise par les paramètres suivants :

- la largeur au fond L (en m)

3.6.2 Section circulaire

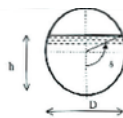


FIGURE 3.3 – Section circulaire

La section circulaire se caractérise par les paramètres suivants :

- le diamètre de la conduite D (en m)
- l'angle θ entre le fond de la conduite et le point de contact entre la surface de l'eau la conduite (en Rad)

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{y}{D/2} \right)$$

$$\theta' = \frac{2}{D \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2y}{D} \right)^2}}$$

3.6.3 Section trapézoïdale

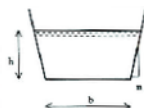


FIGURE 3.4 – Section trapezoidale

La section trapézoïdale se caractérise par les paramètres suivants :

- la largeur au fond L (en m)
- le fruit des berges (inclinaison par rapport à la verticale : élargissement entre le haut et le bas du talus divisé par la profondeur) m (en m/m)

3.6.4 Section parabolique

La section parabolique se caractérise par une largeur au miroir pouvant s'exprimer sous la forme :

$$B = \Lambda y^k.$$

Avec k : coefficient compris entre 0 et 1. $k = 0.5$ correspond à la forme parabolique vraie.

On peut calculer Λ en fournissant :

- y_b : la hauteur de berge (en m)
- B_b : la largeur au niveau des berges (en m)

On a alors : $\Lambda = \frac{B_b}{y_b^k}$

3.7 Formule de Manning-Strickler

3.7.1 Définition

La formule de Manning-Strickler s'écrit de la façon suivante :

$$V = K_s R_h^{2/3} i^{1/2}$$

avec :

- V la vitesse moyenne de la section transversale en m/s
- K_s le coefficient de Strickler
- R_h le rayon hydraulique en m
- i la pente en m/m

Le coefficient de Strickler K_s varie de 20 (pierre brute et surface rugueuse) à 80 (béton lisse et fonte).

Le coefficient de Manning n est obtenu par :

$$n = \frac{1}{K_s}$$

3.7.2 Tableau de Chow (1959)

TABLE 3.1 – Tableau de Chow (1959)

Type de chenal et description	K_s min.	K_s normal	K_s max.
1. Lits mineurs			
a. propres, rectilignes, bien remplis d'eau, sans failles ni mouilles profondes	30	33	40
b. comme ci-dessus, mais plus de pierres et d'herbiers	25	29	33

Type de chenal et description	K_S min.	K_S normal	K_S max.
c. propres, sinueux, quelques mouilles et hauts-fonds	22	25	30
d. comme ci-dessus, mais quelques herbiers et pierres	20	22	29
e. comme ci-dessus, hauteurs d'eau plus faibles, avec des pentes et tronçons plus inefficaces	18	21	25
f. identiques à d avec plus de pierres	17	20	22
g. tronçons mollassons, herbeux, mouilles profondes	13	14	20
h. tronçons très herbeux, mouilles profondes, ou lits moyens encombrés de bois et sous-bois	7	10	13
2. Cours d'eau de montagne, pas de végétation dans le lit, berges généralement abruptes, arbres et broussailles le long des berges immergées en hautes eaux			
a. fond : graviers, pavés, et quelques rochers	20	25	33
b. fond : pavés avec de gros rochers	14	20	25
3. Lits majeurs			
<i>a. Prairie, sans broussailles</i>			
1. herbe rase	29	33	40
2. herbe haute	20	29	33
<i>b. Surfaces cultivées</i>			
1. aucune culture	25	33	50
2. cultures matures en rang	22	29	40
3. cultures matures en champ	20	25	33
<i>c. Broussailles</i>			
1. broussailles dispersées, herbes denses	14	20	29
2. broussailles aérées et arbres, en hiver	17	20	29
3. broussailles aérées et arbres, en été	13	17	25
4. broussailles moyennes à denses, en hiver	9	14	22
5. broussailles moyennes à denses, en été	6	10	14
<i>d. Arbres</i>			
1. saules denses, en été, alignés	5	7	9
2. terres défrichées avec des souches d'arbres, pas de pousses	20	25	33
3. comme ci-dessus, mais avec fort développement de pousses	13	17	20
4. dense présence de bois, quelques arbres couchés, un peu de sous-bois, hautes eaux sous les branches	22	21	20
5. comme le 4., les hautes eaux atteignant les branches	6	8	10
4. Chenaux creusés ou dragués			
<i>a. En terre, droits, et uniformes</i>			
1. propres, récemment achevés	50	56	63
2. propres, après exposition aux intempéries	40	45	56
3. graviers, tronçon uniforme, propre	33	40	45
4. herbe rase, peu d'herbiers	30	37	45

Type de chenal et description	K_S min.	K_S normal	K_S max.
<i>b. En terre, sinueux, et ralentis</i>			
1. pas de végétation	33	40	43
2. herbe, quelques herbiers	30	33	40
3. herbiers denses ou plantes aquatiques dans les chenaux profonds	25	29	33
4. fond en terre et bords en déblais	29	33	36
5. fond pierreux et berges herbeuses	25	29	40
6. fond en galets et bords propres	20	25	33
<i>c. Excavé par dragline ou dragué</i>			
1. pas de végétation	30	36	40
2. broussailles aérées sur les berges	17	20	29
<i>d. Tranchées dans la roche</i>			
1. lisses et uniformes	25	29	40
2. déchiquetées et irrégulières	20	25	29
<i>e. Chenaux pas entretenus, herbiers et broussailles non coupées</i>			
1. herbiers denses, sur toute la hauteur d'écoulement	8	13	20
2. fond propre, broussailles sur les bords	13	20	25
3. comme ci-dessus, plus hautes eaux	9	14	22
4. broussailles denses, hautes eaux	7	10	13
5. Chenaux rectifiés ou construits			
<i>a. Ciment</i>			
1. surface nette	77	91	100
2. mortier	67	77	91
<i>b. Bois</i>			
1. raboté, non traité	71	83	100
2. raboté, créosoté	67	83	91
3. non raboté	67	77	91
4. planche avec tasseaux	56	67	83
5. recouvert de textile imperméabilisant	59	71	100
<i>c. Béton</i>			
1. finition à la truelle	67	77	91
2. finition à l'aplanissoir	63	67	77
3. avec finition, avec du gravier sur le fond	50	59	67
4. sans finition	50	59	71
5. gunite, bonne section	43	53	63
6. gunite, section ondulée	40	45	56
7. sur de la bonne roche excavée		50	59
8. sur de la roche excavée irrégulière		37	45
<i>d. Fond en béton, finition à l'aplanissoir, avec bords en :</i>			
1. pierre de taille liée au mortier	50	59	67
2. pierre brute liée au mortier	42	50	59
3. maçonnerie de ciment moellons, enduit	42	50	63
4. maçonnerie de ciment moellons	33	40	50
5. moellons non liés ou enrochements	29	33	50
<i>e. Fond en graviers, avec bords en :</i>			
1. béton coffré	40	50	59

Type de chenal et description	K_S min.	K_S normal	K_S max.
2. mortier de pierre brute	38	43	50
3. déblais non liés ou enrochements	28	30	43
<i>f. Brique</i>			
1. brique vernissée	67	77	91
2. liée au mortier de ciment	56	67	83
<i>g. Maçonnerie</i>			
1. moellons cimentés	33	40	59
2. moellons non liés	29	31	43
<i>h. Pierre de taille / dallage en pierre</i>	59	67	77
<i>i. Asphalte</i>			
1. lisse		77	77
2. rugueux		63	63
<i>j. Revêtement végétal</i>	2		33

4 Lois d'ouvrages

4.1 Lois d'ouvrages

4.1.1 Description du module de calcul

Ce module de calcul permet de simuler le fonctionnement hydraulique de vannes et de seuils placés en parallèle. Toutes les lois de débits présentées dans Cassiopée sont regroupées dans ce module qui permet notamment de comparer facilement les lois de débit entre elles.

Ce module permet de calculer n'importe quel paramètre manquant parmi :

- Les conditions aux limites (cote de l'eau à l'amont et à l'aval des ouvrages) ;
- Le débit traversant les ouvrages ;
- Les paramètres des ouvrages (cote de crête, largeur, coefficient de débit. ...).

Le module calcule le paramètre demandé et affiche pour chaque ouvrage présent :

- Le débit transitant dans l'ouvrage ;
- Le type d'écoulement : en charge (écoulement pincé sous une vanne), ou à surface libre ;
- Le régime : noyé, partiellement noyé ou dénoyé ;
- Le type de jet pour les écoulements à surface libre : de surface ou plongeant.

4.1.2 Type de jet

Pour la définition du type de jet (plongeant ou de surface), voir : Larinier, M., 1992. Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 45–72. <https://doi.org/10.1051/kmae:1992005>.

Extrait de Larinier, M., 1992. Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 45–72. <https://doi.org/10.1051/kmae:1992005>

La définition retenue dans Cassiopée est la suivante :

- si $DH \geq 0.5H1$ alors le jet est plongeant ;
- si $DH < 0.5H1$ alors le jet est de surface.

Avec $H1$, la charge à l'amont du seuil et DH la perte de charge sur le seuil.

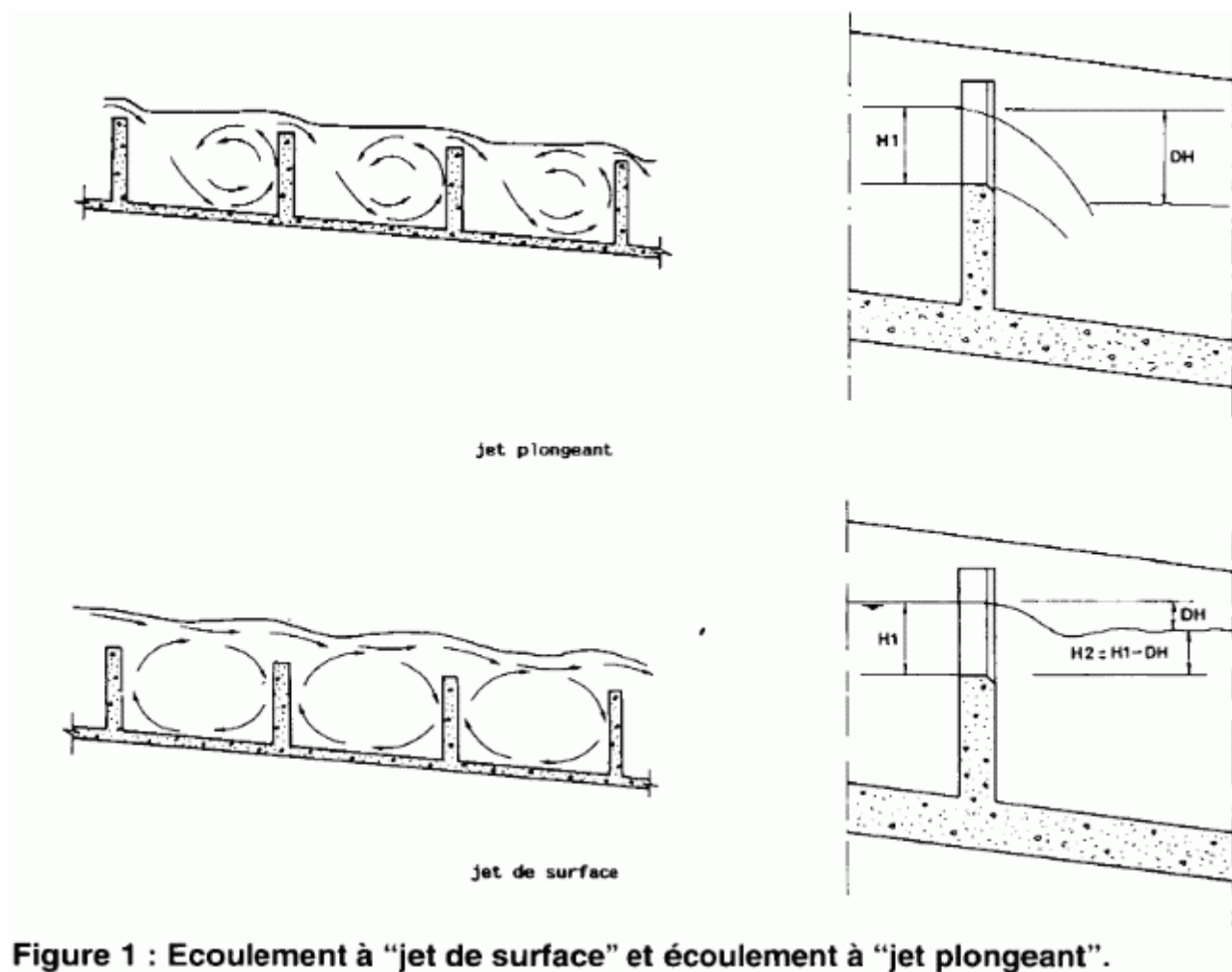


FIGURE 4.1 – Schéma du type de jet

4.2 Lois de déversoirs dénoyés

Ce module de calcul est similaire à celui des Lois d'ouvrages à la différence près qu'il ne simule que des écoulements dénoyés et affine le calcul en utilisant la vitesse d'approche dans le bief amont.

Il permet de calculer la relation entre le niveau de l'eau à l'amont d'un déversoir et le débit. Il est utilisé le plus souvent pour évaluer la relation cote amont-débit au niveau d'un seuil ou d'un ouvrage évacuateur d'un aménagement. L'ouvrage peut comporter plusieurs niveaux de déversement distincts et des déversoirs rectangulaires (à cote de déversement horizontale), triangulaires, semi-triangulaires ou encore triangulaires tronqués.

L'utilisation classique consiste à entrer les niveaux extrêmes (mini/maxi) de la cote de l'eau amont ainsi que le pas de calcul pour lesquels on désire effectuer les estimations de débit.

Les caractéristiques du bief amont (la largeur du bief amont ainsi et la cote du lit) permettent d'évaluer la vitesse d'approche ainsi que l'énergie cinétique amont, exprimée en mètre, et de calculer le débit total à partir de la charge totale compte tenu d'une vitesse d'approche non négligeable.

$$V = \frac{Q}{L \times (Z_1 - Z_{lit})}$$

avec V , la vitesse d'approche, Q le débit, Z_1 la cote de l'eau à l'amont des ouvrages, Z_{lit} la cote du lit à l'amont.

$$E_c = \frac{V^2}{2g}$$

avec E_c l'énergie cinétique amont en mètres, et g l'accélération de la pesanteur (9.81 m.s-2).

La charge H utilisée pour le calcul du débit vaut alors :

$$H = Z_1 + E_c$$

La difficulté du calcul réside dans le fait que le débit à calculer intervient dans le calcul de la charge. Ce problème est résolu avec l'algorithme du point fixe où le calcul du débit est répété plusieurs fois en mettant la charge à jour à chaque itération jusqu'à ce que le calcul converge vers la valeur finale du débit.

Le coefficient de correction lié à la vitesse d'approche C_v est ensuite calculé en faisant le rapport entre le débit obtenu avec la charge H et le calcul du débit avec la cote amont Z_1 .

4.3 Cloisons

Cet outil qui est similaire à celui des Lois d'ouvrages, est une aide au prédimensionnement hydraulique d'une passe à bassins : il est utilisé le plus souvent pour le dimensionnement des échancrures, fentes, orifices caractérisant les cloisons d'une passe ainsi que pour le calage en altitude des échancrures, fentes et radier du bassin amont d'une passe.

Il permet de calculer la valeur manquante des 7 valeurs caractérisant la chute, la surface de l'orifice noyé, la largeur de la fente, la charge sur la fente, la largeur de l'échancrure, la charge sur l'échancrure et le débit.

Les données à fournir obligatoirement sont les dimensions des bassins (largeur et longueur) ainsi que le tirant d'eau moyen en mètres. Ces données associées à la chute entre bassins permettent de calculer la puissance volumique dissipée.

Une fois le calcul de la cloison effectué, l'outil propose de créer une passe à bassin à partir de cette cloison en précisant, la cote amont de l'eau, le nombre de chute et la cote aval de l'eau de la passe.

4.3.1 Ouvrages hydrauliques pouvant constituer la cloison

L'outil permet de placer un ou plusieurs ouvrages en parallèle parmi les types d'ouvrages suivants :

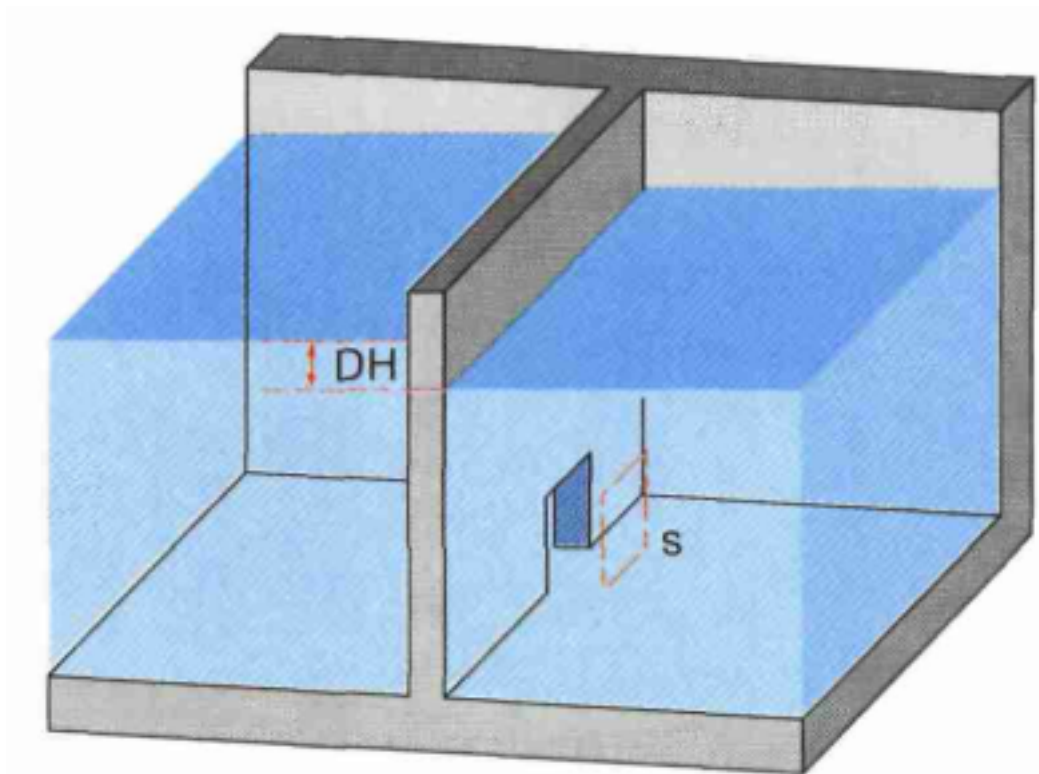


FIGURE 4.2 – Schéma orifice noyé

4.3.1.1 Orifice noyé

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation de l'orifice noyé est décrite sur la page de la formule de l'orifice noyé.

4.3.1.2 Fente noyée

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation de la fente noyée est décrite sur la page de la formule de la fente noyée.

4.3.1.3 Echancrure

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation utilisée pour l'échancrure est celle de Kindsvater-Carter et Villemonte.

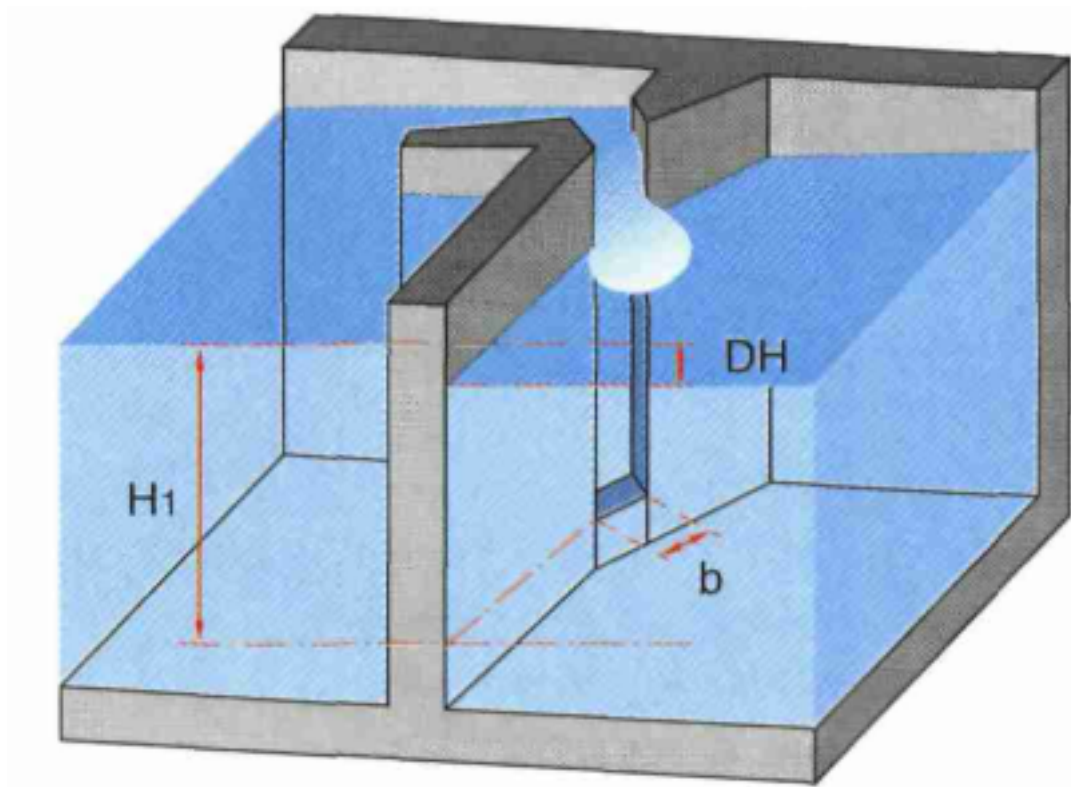


FIGURE 4.3 – Schéma de la fente noyée

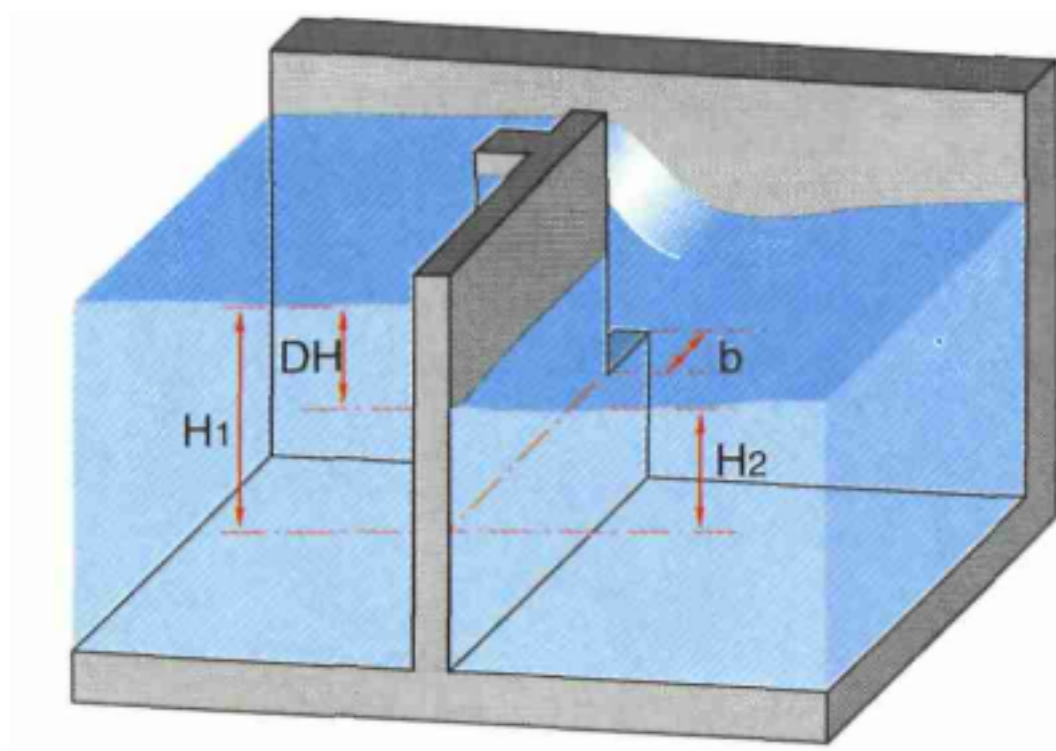


FIGURE 4.4 – Schéma de l'échancrure

4.4 Equations d'ouvrages

4.4.1 Liste des équations d'ouvrages

TABLE 4.1 – Liste des équations d'ouvrages

Typologie d'ouvrages	Géométrie de l'ouvrage		Régimes d'écoulement	Nom de l'équation	Coef. Débit par défaut	Modules
	Type d'ouvrage					
Seuil déversant à surface libre	Rectangulaire	Seuil mince (échan-crure)	Dénoyé	Poleni	0,4	Lois d'ouvrages, lois déversoirs dénoyés
		Seuil mince (fente)	Noyé	Rajaratnam	0,9	Lois d'ouvrages
		Seuil mince (fente)	Noyé	Fente Larinier	à définir par projecteur	Lois d'ouvrages, cloisons, cloison aval
		Seuil mince (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Kindsvater-Carter & Ville-monte	$\alpha = 0.4 ; \beta = 0.001$	Lois d'ouvrages
		Seuil mince (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Villemonte	0,4	Lois d'ouvrages, cloisons, cloison aval
		Seuil mince régulé (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Villemonte	0,4	Cloison aval
		Seuil mince régulé (fente)	Noyé	Fente Larinier	à définir par projecteur	Cloison aval
		Seuil mince (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Villemonte	1,36	Lois d'ouvrages, lois déversoirs dénoyés, cloisons, cloisons aval
		Seuil épais (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Bos	1,36	Lois d'ouvrages, lois déversoirs dénoyés, cloisons, cloisons aval
		Seuil mince (échan-crure)	Noyé / dé-noyé	Villemonte	1,36	Lois d'ouvrages, lois déversoirs dénoyés, cloisons, cloisons aval
Orifice / vanne de fond supportant l'écoulement déversant à surface libre	Rectangulaire	Seuil épais (échan-crure) / orifice	Noyé / dé-noyé	Cemagref-D	0,4	Lois ouvrages, cloisons, pré-barrages

Typologie d'ouvrages	Géométrie de l'ouvrage	Type d'ouvrage	Régimes d'écoulement	Nom de l'équation	Coef. Débit par défaut	Modules
Vannes / orifices en charge	Rectangulaire	Seuil épais (échan-crure) / orifice	Noyé / dé-noyé	Cunge	1	Lois ouvrages, pré-barrages
	Rectangulaire	Seuil épais (échan-crure) / vanne de fond	Noyé / dé-noyé	Cemagref-V	0,6	Lois ouvrages, cloison aval, pré-barrages
	Rectangulaire	Vanne de fond	Dénoyé	Vanne de fond dénoyée (Bernoulli)	0,6	Lois d'ouvrages
	Rectangulaire	Vanne de fond	Noyé	Vanne de fond noyée	0,8	Lois d'ouvrages
	Indéfini	Orifice	Dénoyé	Orifice dénoyé (Bernoulli)	0,7	Lois d'ouvrages
	Indéfini	Orifice	Noyé	Orifice noyé (Bernoulli)	0,7	Lois d'ouvrages, cloisons, cloison aval

4.4.1.1 Relation entre cote de l'eau et charge

La plupart des lois de débit de cette documentation font référence à la **hauteur d'eau** h ou à la **charge** H . Ces deux notions sont généralement confondues car l'énergie cinétique est négligée (Voir le détail du calcul de la charge dans l'outil "Lois de déversoirs dénoyés"). Ces grandeurs correspondent à la différence de cote entre la surface libre amont Z_1 ou aval Z_2 et la base du seuil déversant Z_d .

On a alors :

$$h_1 = Z_1 - Z_d$$

et

$$h_2 = Z_2 - Z_d$$

4.4.1.2 Seuil à crête mince ou crête épaisse ?

Extrait de CETMEF, 2005. Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, Compiègne.

Le type de seuil est relatif à l'écoulement au droit de l'ouvrage.

En effet, plus l'épaisseur de la crête du seuil est négligeable devant la hauteur d'eau amont au-dessus de celui-ci, plus le seuil paraît transparent vis-à-vis de l'écoulement et donc plus la crête du seuil paraît mince.

A l'inverse, plus la ligne d'eau amont se rapproche de la crête du seuil, plus la largeur du seuil paraît grande vis-à-vis de l'épaisseur de la lame d'eau qui y transite et donc plus la crête du seuil paraît épaisse. Un déversoir en rivière appartient ainsi à l'une des trois catégories suivantes :

- seuil à crête mince
- seuil à crête épaisse
- seuil à crête non définie

Afin de déterminer le type de seuil étudié, les conditions suivantes doivent être vérifiées :

- si $C < \frac{H_1}{2}$, alors le seuil est à crête mince ;
- si $C > \frac{2H_1}{3}$, alors le seuil est à crête épaisse.

4.4.2 Formule de Kindsvater-Carter et Villemonte

Le module de calcul permet d'effectuer des calculs hydrauliques pour plusieurs ouvrages en parallèle.

4.4.2.1 Formule de Kindsvater-Carter (1957)

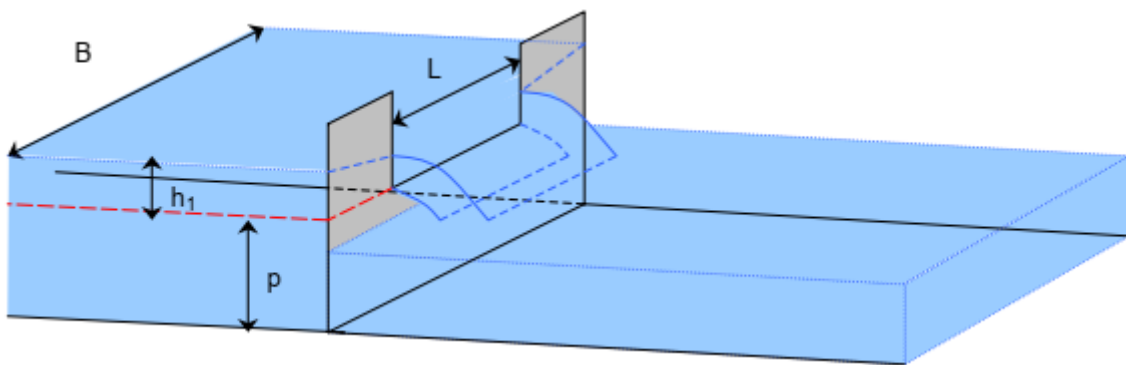


FIGURE 4.5 – Formule de Kindsvater-Carter : Schéma déversoir

Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire avec contraction latérale (Extrait de CETMEF, 2005)

La formule de Kindsvater-Carter correspond à la formule classique du déversoir :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} h_1^{1.5}$$

Avec :

- μ le coefficient de débit $\mu = \alpha + \beta h_1/p$
- L la largeur du déversoir
- h_1 la hauteur d'eau au dessus de la crête du déversoir
- p la pelle ou hauteur de la crête du déversoir

Les coefficient α et β dépendent du rapport entre la largeur du déversoir (L) et la largeur du bassin (B). Leurs valeurs sont données par les abaques ci dessous (extrait de Larinier, M., Porcher, J.-P., 1986. Programmes de calcul sur HP86 : hydraulique et passes à poissons) :

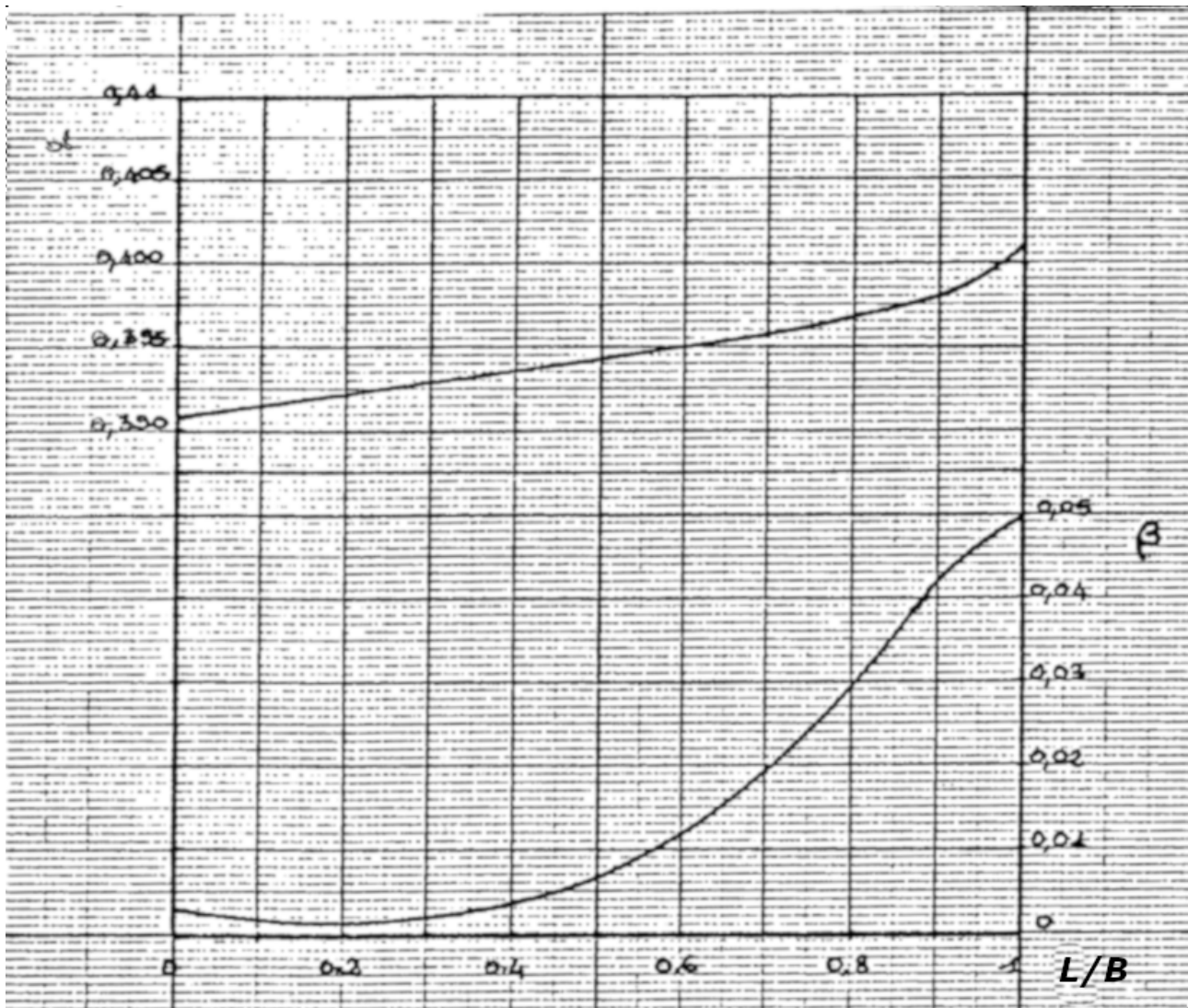


FIGURE 4.6 – Formule de Kindsvater-Carter : Abaques

4.4.2.2 Écoulement noyé : formule de Villemonte (1947)

Extrait de CETMEF, 2005

Pour une cote de l'eau aval supérieure à la cote de la crête du déversoir, l'écoulement est noyé et un coefficient de noyage s'applique sur le coefficient de débit.

Villemonte propose la formule suivante :

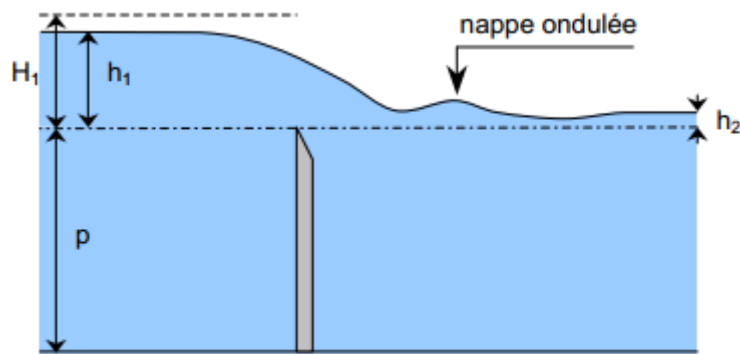


Figure 36 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé

FIGURE 4.7 – Formule de Villemonte : schéma seuil noyé

$$K = \frac{Q_{noyé}}{Q_{dénouyé}} = \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n \right]^{0.385}$$

Avec :

- h_1 la hauteur d'eau amont au dessus de la crête du déversoir
- h_2 la hauteur d'eau aval au dessus de la crête du déversoir
- n l'exposant dans les relations d'écoulement dénoyé (rectangulaire=1.5, triangulaire=2.5, parabolique=2)

Voir aussi : Villemonte 1947

4.4.2.3 Références

CETMEF. Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Compiègne : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, 2005. http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0513410/notice-sur-les-deversoirs-synthese-des-lois-d-ecoulement-au-droit-des-seuils-et-deversoirs

4.4.3 Formule de l'orifice noyé

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation correspond à peu de chose près à celle du module de calcul de la vanne rectangulaire noyée à la différence près que la surface de l'orifice est donnée directement plutôt que par le rapport de la largeur avec la hauteur :

$$Q = \mu S \sqrt{2g\Delta H}$$

Avec :

- Q le débit en m³/s ;
- μ le coefficient de débit (égal à 0.7 par défaut) ;
- S la surface de l'orifice en m² ;
- ΔH La perte de charge $H_1 - H_2$ en m (noté "Chute" dans Cassiopée).

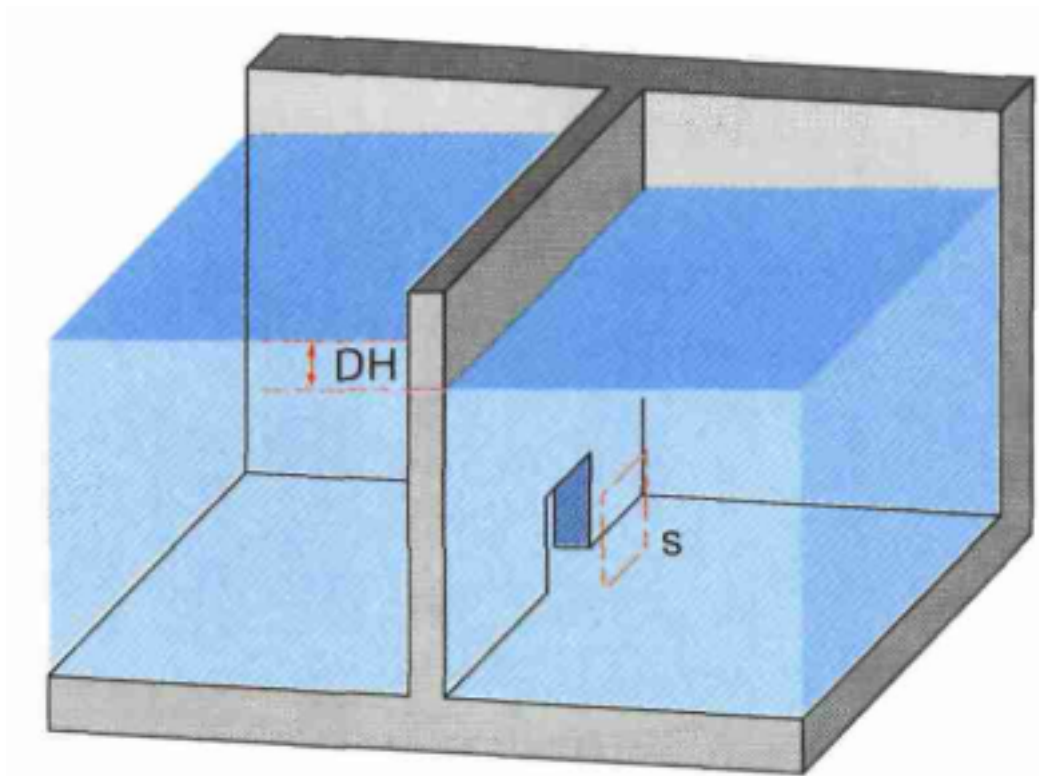


FIGURE 4.8 – Schéma orifice noyé

4.4.4 Formule de l'orifice dénoyé

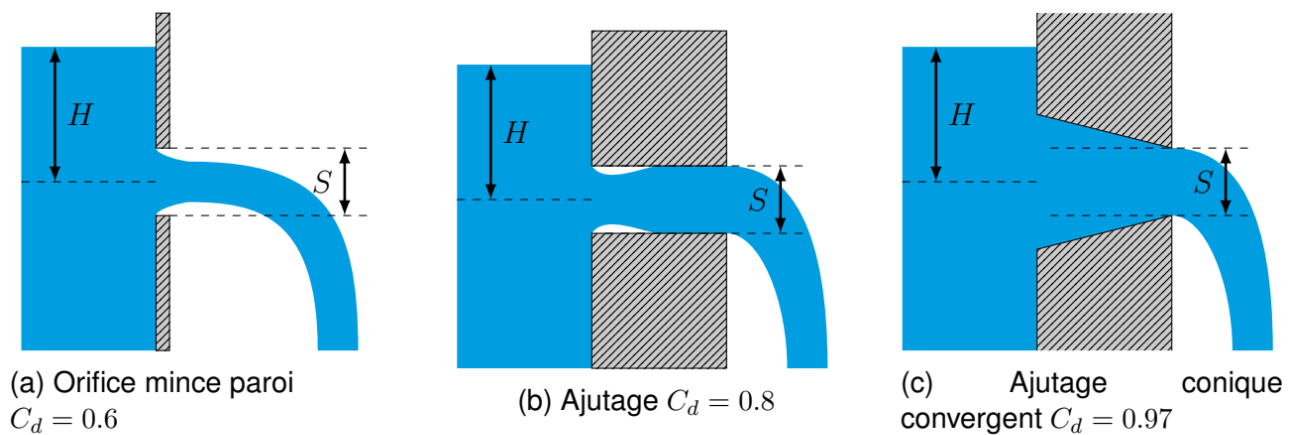


FIGURE 5.12 – Schémas explicatifs des écoulements à travers des orifices ou ajutages dénoyés

FIGURE 4.9 – Schéma orifice dénoyé

Extrait de CARLIER, M. (1972). *Hydraulique générale et appliquée*. OCLC : 421635236. Paris : Eyrolles

La formule générale pour un orifice ou un ajutage dénoyé est la suivante (CARLIER, 1972) :

$$Q = C_d S \sqrt{2gH}$$

Avec :

- Q le débit en m³/s ;
- C_d le coefficient de débit ;
- S la surface de l'orifice en m² ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à 9.81 m/s²
- H La hauteur d'eau mesurée entre la surface de l'eau et le centre de l'orifice en mètres.

La surface S à prendre en compte est la section la plus réduite de l'orifice ou de l'ajutage (Figure 5.12c). Le coefficient de débit C_d varie en fonction du type d'orifice ou d'ajutage. La Figure 5.12 présente les formes et les coefficients de débit les plus courants (Source CARLIER, 1972).

4.4.5 Formule de la fente noyée

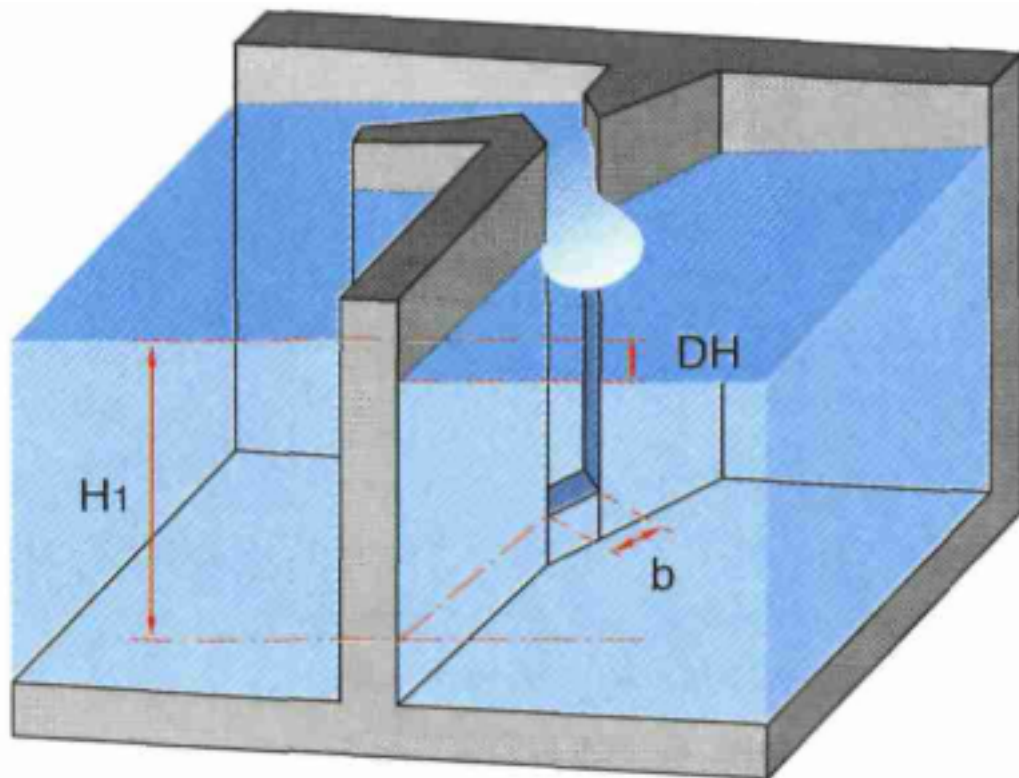


FIGURE 4.10 – Schéma de la fente noyée

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

Larinier (1992) propose l'équation suivante :

$$Q = C_d b H_1 \sqrt{2g \Delta H}$$

Avec :

- b la largeur de la fente en m
- H_1 la charge sur la fente m
- C_d le coefficient de débit.

4.4.6 Coefficient de débit C_d pour la formule de la fente noyée (passe à bassins à fente verticale)

Le coefficient de débit **C_d** est un paramètre important pour le dimensionnement des passes à fente(s) verticale(s). Ce terme est intégré dans la formule de débitance d'un déversoir de type fente noyée, qui relie le débit transité avec la chute entre bassins, la charge amont sur la fente et sa largeur.

Pour les passes à simple fente verticale, des études réalisées sur modèle-réduit et par simulations numériques ont permis de déterminer des valeurs moyennes de coefficients de débit selon différentes configurations, pour une géométrie type de fente et de déflecteurs définie à partir des passes à fentes verticales construites en France (Figure 1). Une géométrie différente de fente et de déflecteur peut induire des écarts par rapport aux valeurs moyennes des coefficients de débit selon les configurations indiquées ci-dessous.

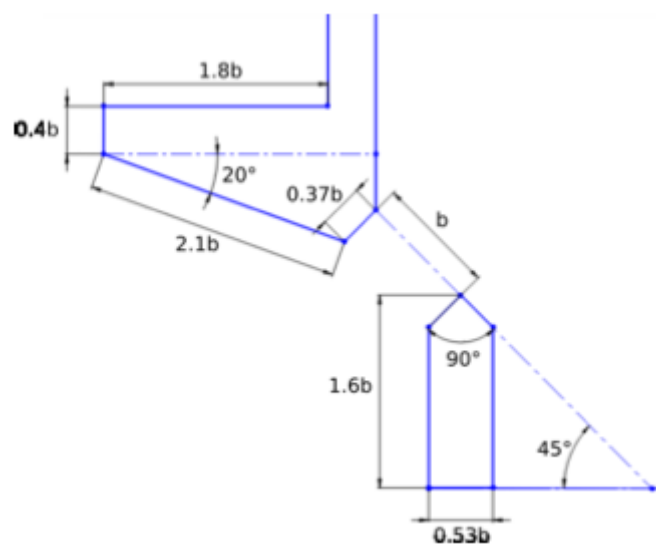


FIGURE 4.11 – Figure 1

Figure 1 : géométrie type de fente et de déflecteurs à partir de laquelle les valeurs des coefficients de débit ont été déterminés (Ballu, 2017)

- **Dans des conditions de radier lisse (sans rugosité de fond) et en l'absence de seuil dans la fente**, Wang *et al.* (2010) et Ballu *et al.* (2017) ont montré que la valeur du **C_d** n'est pas significativement influencée par le débit et dépend principalement de la pente **S** (%) et du rapport entre la largeur des bassins **B** et la largeur de la fente **b** (**B/b**).
- **Dans des conditions de radier lisse (sans rugosité de fond) avec la présence d'un seuil dans la fente**, selon 3 configurations de hauteurs de seuils **h_s** rapportées à la largeur de la fente **b** (**$h_s/b = 0.5, 1$ et 1.5**), Ballu *et al.* (2015) et Ballu (2017) ont montré que la valeur du **C_d** n'est pas significativement influencée par le débit, et qu'elle est principalement influencée par la pente **S** , le rapport de forme **B/b** et la hauteur des seuils **h_s** .
- **Dans des conditions de radier avec rugosités de fond préfabriquées et en l'absence de seuil dans la fente**, avec des rugosités régulièrement réparties de hauteur **$h_r/b = 2/3$** et de diamètre **$\varnothing r/b = 1/2$** , selon 2 configurations de densités **d_r** de 10% et 15%, Ballu *et al.* (2017) et Ballu (2017) ont montré que la valeur du **C_d** n'est pas

significativement influencée par le débit, et qu'elle est principalement influencée par la pente **S**, le rapport de forme **B/b** et la présence de la rugosité de fond **dr**.

- En fonction de ces différentes configurations, les valeurs moyennes du coefficient de débit s'étalent d'environ 0.62 jusqu'à près de 0.88 (Figure 2).

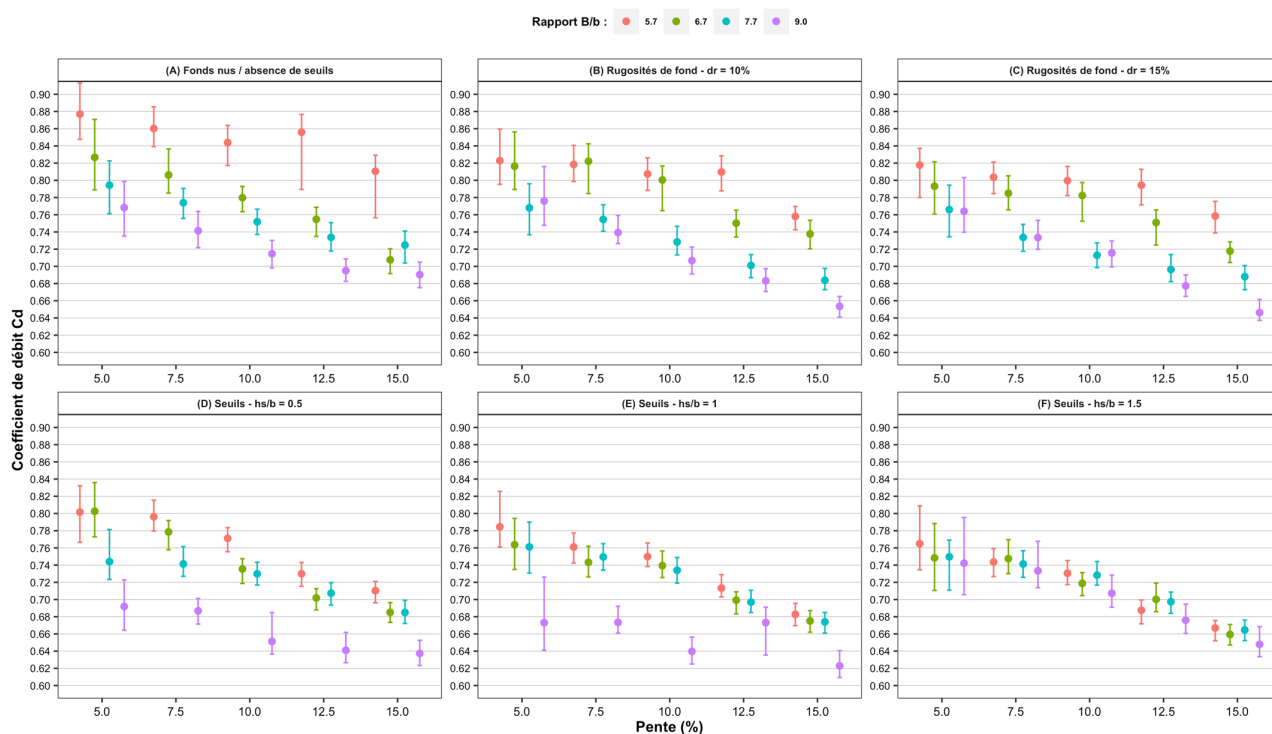


FIGURE 4.12 – Figure 2

Figure 2 : valeurs moyennes et incertitudes (intervalles de confiance à 95%, $k=2$) des coefficients de débits selon la pente S et le rapport de forme B/b pour différentes configurations : (A) radier lisse sans seuil dans la fente, (B) rugosités de fond $dr = 10\%$ sans seuil dans la fente, (C) rugosités de fond $dr = 15\%$ sans seuil dans la fente, (D) seuil dans la fente $hs/b = 0.5$ et radier lisse, (E) seuil dans la fente $hs/b = 1$ et radier lisse, (F) seuil dans la fente $hs/b = 1.5$ et radier lisse

Pour les passes à doubles fentes verticales, des valeurs de **Cd** comprises entre 0.75 et 0.80 sont couramment retenues pour les dispositifs construits récemment avec des pentes longitudinales entre 4% et 5.5%. Des études sont en cours afin de préciser l'influence de différentes configurations sur les coefficients de débits et leurs valeurs correspondantes.

Bibliographie :

Ballu A., Pineau G., Calluad D., David L. (2015). Experimental study of the influence of sills on vertical slot fishway flow. *36th IAHR World Congress*, 7p.

Ballu A. (2017). Étude numérique et expérimentale de l'écoulement turbulent au sein des passes à poissons à fentes verticales. Analyse de l'écoulement tridimensionnel et instationnaire. *Thèse de l'Université de Poitiers*, 223p.

Ballu A., Calluad D., Pineau G., david L. (2017). Experimental study of the influence of macro-roughnesses on vertical slot fishway flows. *La Houille Blanche*, 2 : 9-14.

Wang R.W., David L., Larinier M. (2010). Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 396(2).

4.4.7 Formule du déversoir noyé (Rajaratnam, 1969)

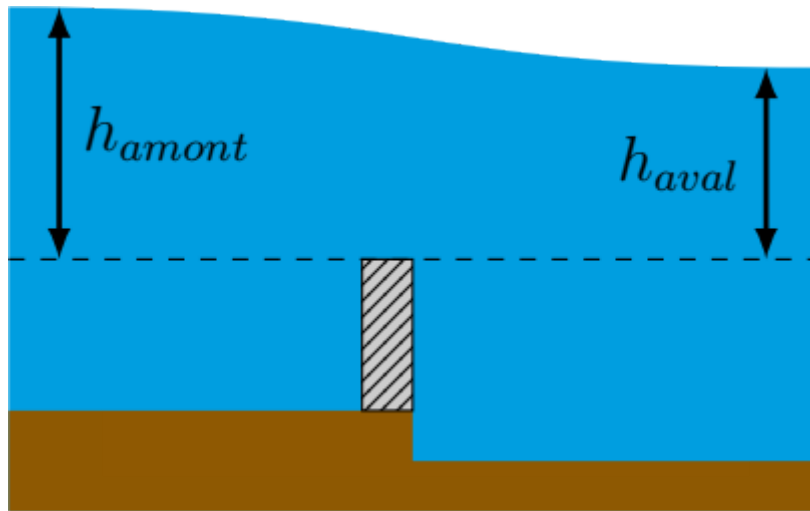


FIGURE 4.13 – Schéma du seuil noyé

En régime noyé, le débit dépend de la hauteur d'eau amont h_1 et de la hauteur aval h_2 (Rajaratnam et al., 1969) :

$$Q = Cd\sqrt{2gL}h_2\sqrt{h_1 - h_2}$$

Avec :

- L la largeur du seuil en m
- h_1 la charge sur le seuil à l'amont en m
- h_2 la charge sur le seuil à l'aval en m
- C_d le coefficient de débit (égal à 0.9 par défaut).

Cette formule n'est pas conseillée pour un ennoïement inférieur à 80%.

Rajaratnam, N., Muralidhar, D., 1969. Flow below deeply submerged rectangular weirs. Journal of Hydraulic Research 7, 355–374.

4.4.8 Formule du déversoir dénoyé

La formule est dérivée de la formule originale de Poleni (1717).

En régime dénoyé, le débit ne dépend que de la hauteur d'eau amont h_1 :

$$Q = Cd\sqrt{2gL}h_1^{3/2}$$

Avec :

- Q le débit en m³/s
- Cd le coefficient de débit
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à 9.81 m/s²
- L la largeur du déversoir en m
- h_{amont} la hauteur d'eau à l'amont au dessus de la crête du déversoir en m

Une valeur du coefficient de débit $C_d = 0.4$ est généralement une bonne approximation pour un seuil rectangulaire. Pour des formes de déversoir plus complexes (trapézoïdale, circulaire. . .) ou pour prendre en compte des caractéristiques du profil longitudinal (seuil à crête mince, à crête épaisse), on pourra se reporter à la notice sur les déversoirs du CETMEF (CETMEF, 2005).

CETMEF (2005). Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Compiègne : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales. 89 p.

4.4.9 Formule du déversoir triangulaire

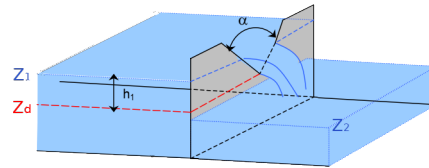


FIGURE 4.14 – Vue en perspective d'un déversoir triangulaire

Vue en perspective d'un déversoir triangulaire (d'après CETMEF, 2005)

4.4.9.1 Formule du déversoir dénoyé

$$Q = C_d * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) (Z_1 - Z_d)^{2.5}$$

Avec :

- C_d : coefficient de débit
- $\alpha/2$: le demi-angle au sommet du triangle
- Z_1 : cote de l'eau à l'amont du seuil
- Z_d : cote de déversement de la pointe du triangle

Le coefficient de débit C_d dépend notamment de l'épaisseur du déversoir :

- Déversoir en mince paroi : $C_d = 1.37$
- Déversoir épais sans contraction (arrondi $r > 0.1 * h_1$) : $C_d = 1.27$
- Déversoir à profil triangulaire : (1/2 amont, 1/2 ou 1/5 aval) : $C_d = 1.68$ et 1.56

4.4.9.2 Ennoisement d'un seuil triangulaire mince

Le seuil est noyé dès que $Z_2 > Z_d$ et le coefficient de réduction de Villemonte est alors appliqué sur le débit calculé en régime dénoyé.

4.4.9.3 Ennoisement d'un seuil triangulaire épais

L'ennoisement a lieu pour $h_2/h_1 > 4/5$ avec $h_1 = Z_1 - Z_d$ et $h_2 = Z_2 - Z_d$, et avec Z_2 la cote de l'eau à l'aval du seuil.

Le coefficient de réduction proposé par Bos (1989) est alors appliqué :

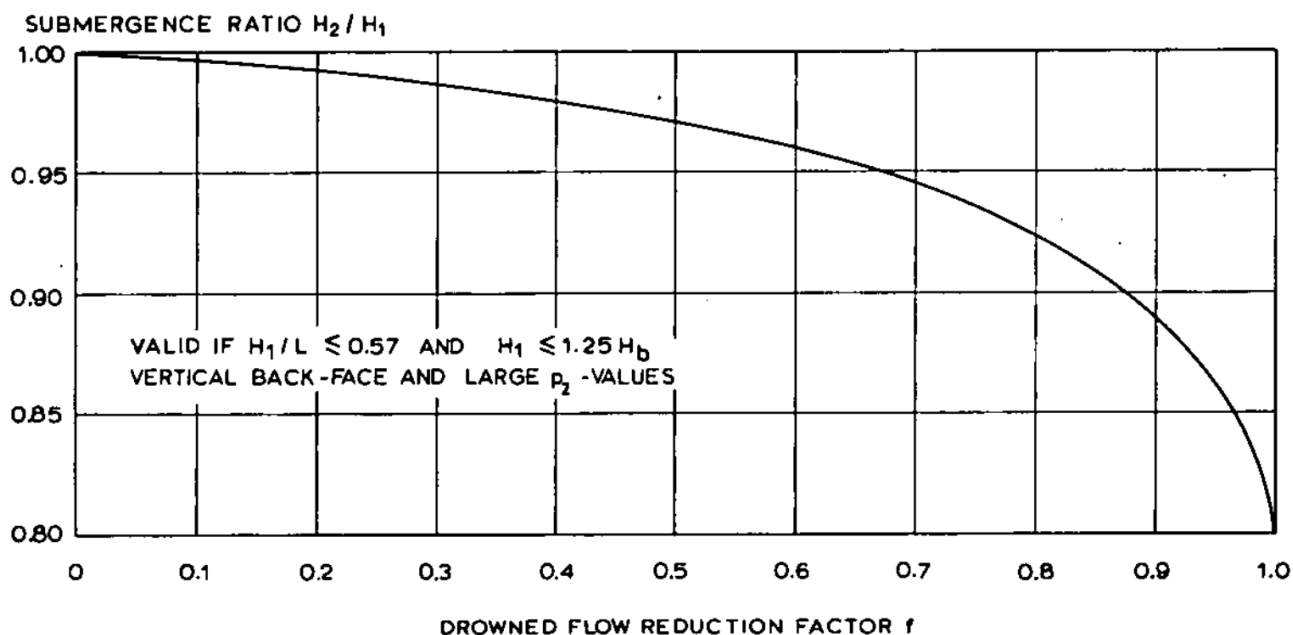


FIGURE 4.15 – Coefficient d'ennoiement pour un déversoir triangulaire à crête épaisse (d'après Bos, 1989)

Coefficient d'ennoiement pour un déversoir triangulaire à crête épaisse (extrait de Bos, 1989)

L'abaque est approché par la formule suivante :

$$K_s = \sin(3.9629(1 - h_2/h_1)^{0.575})$$

4.4.9.4 Références

CETMEF, 2005. Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, Compiègne.

Bos, M.G., 1989. Discharge measurement structures., 3rd edition. ed, Publication. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

4.4.10 Formule du déversoir triangulaire tronqué

Le déversoir triangulaire tronqué est caractérisée par les paramètres suivants :

- C_d : coefficient de débit
- Z_d : cote de déversement basse du triangle
- Z_t : cote de déversement haute du triangle
- $B/2$: demi-ouverture du triangle

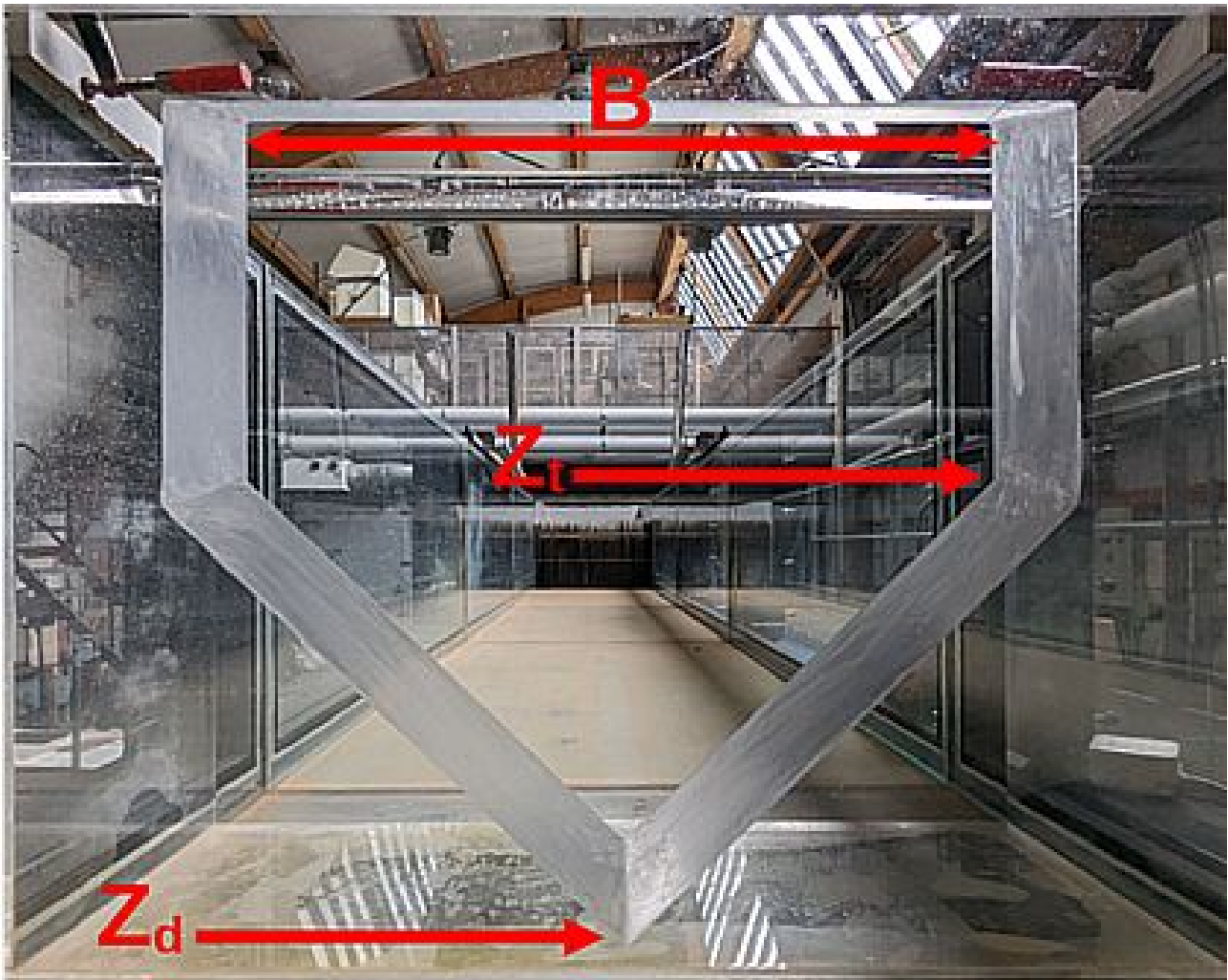


FIGURE 4.16 – Schéma d'un seuil triangulaire tronqué

4.4.10.1 Formule

pour $Z_1 \leq Z_t$

$$Q = C_d \frac{B}{2(Z_t - Z_d)} (Z_1 - Z_d)^{2.5}$$

pour $Z_1 > Z_t$

$$Q = C_d \frac{B}{2(Z_t - Z_d)} ((Z_1 - Z_d)^{2.5} - (Z_1 - Z_t)^{2.5})$$

Déversoir en mince paroi : $C_d = 1.37$

Déversoir épais sans contraction (arrondi $r > 0.1 * h_1$) : $C_d = 1.27$

Déversoir à profil triangulaire : (1/2 amont, 1/2 ou 1/5 aval) : $C_d = 1.68$ et 1.56

4.4.11 Cemagref-V : Déversoir / Vanne de fond (pelle faible)

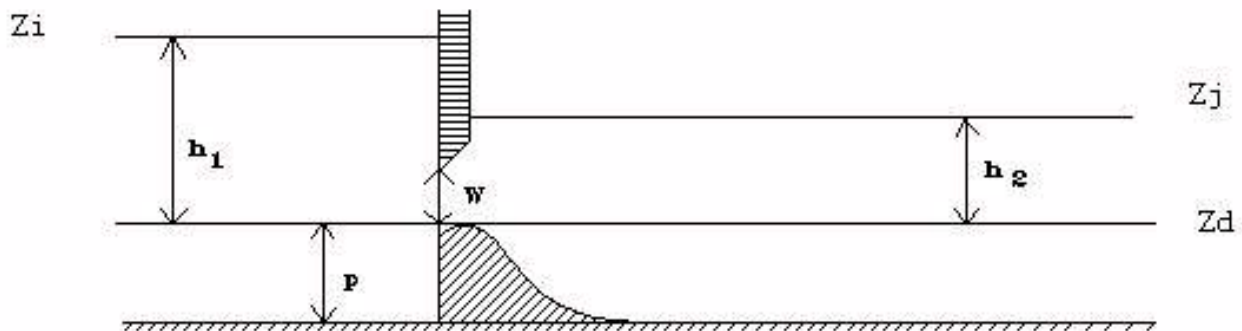


FIGURE 4.17 – Schéma CEM 88 V

4.4.11.1 Déversoir - régime dénoyé

$$Q = \mu_f L \sqrt{2g} h_1^{3/2}$$

4.4.11.2 Déversoir - régime noyé

$$Q = k_F \mu_F L \sqrt{2g} h_1^{3/2}$$

k_F coefficient de réduction de débit en noyé. Le coefficient de réduction de débit est fonction de $\frac{h_2}{h_1}$ et de la valeur α de ce rapport au moment du passage noyé dénoyé. L'ennoyement est obtenu quand $\frac{h_2}{h_1} > \alpha$. La loi de variation de k_F a été ajustée sur les résultats expérimentaux ($\alpha = 0.75$).

Posons $x = \sqrt{1 - \frac{h_2}{h_1}}$:

- Si $x > 0.2$: $k_F = 1 - \left(1 - \frac{x}{\sqrt{1-\alpha}}\right)^\beta$
- Si $x \leq 0.2$: $k_F = 5x \left(1 - \left(1 - \frac{0.2}{\sqrt{1-\alpha}}\right)^\beta\right)$

Avec $\beta = -2\alpha + 2.6$, on calcule un coefficient de débit dénoyé équivalent comme précédemment.

4.4.11.3 Vanne de fond - régime dénoyé

$$Q = L \sqrt{2g} \left(\mu h_1^{3/2} - \mu_1 (h_1 - W)^{3/2} \right)$$

On constate expérimentalement que le coefficient de débit d'une vanne augmente avec $\frac{h_1}{W}$. On a ajusté une loi de variation de μ de la forme :

$$\mu = \mu_0 - \frac{0.08}{\frac{h_1}{W}} \text{ avec : } \mu_0 \simeq 0.4$$

$$\text{donc } \mu_1 = \mu_0 - \frac{0.08}{\frac{h_1}{W} - 1}$$

Pour assurer la continuité avec la surface libre dénoyée pour $\frac{h_1}{W} = 1$, il faut donc que $\mu_F = \mu_0 - 0.08$ soit $\mu_F = 0.32$ pour $\mu_0 = 0.4$

4.4.11.4 Vanne de fond - régime noyé

Régime partiellement noyé

$$Q = L\sqrt{2g} \left[k_F \mu h_1^{3/2} - \mu_1 (h_1 - W)^{3/2} \right]$$

k_F étant le même que pour la surface libre.

Le passage noyé-dénoué a été ajusté sur les résultats expérimentaux, on a une loi du type :

$$\alpha = 1 - 0.14 \frac{h_2}{W}$$

$$0.4 \leq \alpha \leq 0.75$$

Pour assurer la continuité avec le fonctionnement à surface libre, il faut donc que le passage noyé-dénoué à surface libre se fasse pour $\alpha = 0.75$ au lieu de $2/3$ dans la formulation déversoir orifice.

Régime totalement noyé

$$Q = L\sqrt{2g} \left(k_F \mu h_1^{3/2} - k_{F1} \mu_1 (h_1 - W)^{3/2} \right)$$

La formulation de k_{F1} est la même que celle de k_F en remplaçant h_2 par $h_2 - W$ (et h_1 par $h_1 - W$) pour le calcul du coefficient x et de α (et donc de k_{F1}).

Le passage en totalement noyé a lieu pour :

$$h_2 > \alpha_1 h_1 + (1 - \alpha_1)W$$

$$\text{avec : } \alpha_1 = 1 - 0.14 \frac{h_2 - W}{W}$$

$$(\alpha_1 = \alpha(h_2 - W))$$

Le fonctionnement déversoir-vanne est représenté par les équations ci-dessus et la figure ci-dessous. Quel que soit le type d'écoulement en charge, on calcule un coefficient de débit dénoyé équivalent correspondant à une formulation classique de la vanne dénoyée :

$$C_F = \frac{Q}{L\sqrt{2g}W\sqrt{h_1}}$$

Le coefficient directeur par défaut pour l'ouvrage est un coefficient C_G habituellement proche de 0.6. On le transforme alors en $\mu_0 = \frac{2}{3}C_G$, qui permet de calculer μ et μ_1 de l'équation de la vanne dénoyée.

Remarque : il est possible d'obtenir $C_F \neq C_G$, même en régime dénoyé, du moment que le coefficient de débit augmente avec le rapport $\frac{h_1}{W}$.

- (12) : Déversoir - dénoyé
- (19) : Orifice - partiellement noyé
- (17) : Déversoir - régime noyé
- (20) : Orifice - totalement noyé
- (18) : Orifice - dénoyé

Formulation classique du déversoir dénoyé ($\mu_F \simeq 0.4$).

4.4.12.2 Déversoir - régime noyé

$$(h_1 < W \text{ et } h_2 \geq \frac{2}{3}h_1)$$

$$Q = \mu_S L \sqrt{2g} (h_1 - h_2)^{1/2} h_2$$

Formulation classique du déversoir noyé.

Le passage noyé-dénoyé s'effectue pour $h_2 = \frac{2}{3}h_1$, on a alors :

$$\mu_S = \frac{3\sqrt{3}}{2} \mu_F \text{ pour } \mu_F = 0.4 \Rightarrow \mu_S = 1.04$$

On peut calculer un coefficient de débit dénoyé équivalent :

$$\mu_F = \frac{Q}{L \sqrt{2g} h_1^{3/2}}$$

qui permet de juger du degré d'ennoïement du seuil en le comparant au coefficient dénoyé μ_F introduit. En effet, le coefficient directeur de l'ouvrage introduit est celui du déversoir dénoyé (μ_F proche de 0.4).

4.4.12.3 Orifice - régime dénoyé

$$(h_1 \geq W \text{ et } h_2 \leq \frac{2}{3}h_1)$$

On prend une formulation du type :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} \left(h_1^{3/2} - (h_1 - W)^{3/2} \right)$$

Cette modélisation s'applique bien aux orifices rectangulaires de grande largeur.

La continuité vers le fonctionnement à surface libre est assuré quand :

$$\frac{h_1}{W} = 1, \text{ on a alors } \mu = \mu_F.$$

4.4.12.4 Orifice - régime noyé

Il existe deux formulations suivant que l'on est partiellement noyé ou totalement noyé.

Régime partiellement noyé

$$(h_1 \geq W \text{ et } \frac{2}{3}h_1 < h_2 < \frac{2}{3}h_1 + \frac{W}{3})$$

$$Q = \mu_F L \sqrt{2g} \left[\frac{3\sqrt{3}}{2} \left((h_1 - h_2)^{1/2} h_2 \right) - (h_1 - W)^{3/2} \right]$$

Régime totalement noyé

$$(h_1 \geq W \text{ et } \frac{2}{3}h_1 + \frac{W}{3} < h_2)$$

$$Q = \mu' L \sqrt{2g} (h_1 - h_2)^{1/2} [h_2 - (h_2 - W)] \Rightarrow Q = \mu' L \sqrt{2g} (h_1 - h_2)^{1/2} W$$

Formulation classique des orifices noyés, avec $\mu' = \mu_S$.

Le fonctionnement déversoir orifice est représenté par les équations ci-dessus et la figure ci-dessous. Quel que soit le type d'écoulement en charge, on calcule un coefficient de débit dénoyé équivalent correspondant à la formulation classique de l'orifice dénoyé :

$$C_F = \frac{Q}{L\sqrt{2g}W(h_1 - 0.5W)^{1/2}}$$

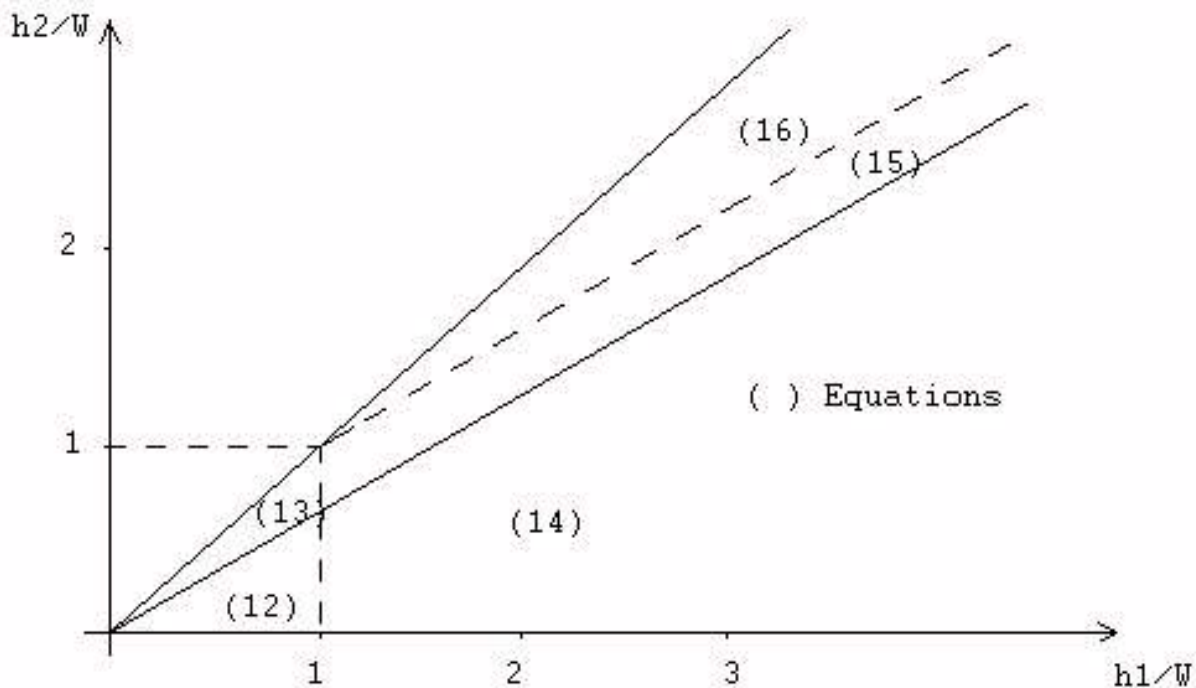


FIGURE 4.20 – Graphique CEM 88 D

- (12) : Déversoir - dénoyé
- (15) : Orifice - partiellement noyé
- (13) : Déversoir - régime noyé
- (16) : Orifice - totalement noyé
- (14) : Orifice - dénoyé

4.4.12.5 Références

Baume, Jean-Pierre. 1988. « Modélisation des ouvrages de type : déversoir, vanne, orifice, dans les modèles d'hydraulique à surface libre ». Montpellier n°205-Document de travail 87.1. Montpellier, France : CEMAGREF. <https://hal.inrae.fr/hal-04970129>

4.4.13 Formules de Cunge 1980

Cette loi de débit est inspirée des équations décrites par Cunge dans son livre¹, ou avec plus de détails dans un article de Mahmood et Yevjevich². Cette loi est une compila-

1. Cunge, Holly, Verwey, 1980, "Practical aspects of computational river hydraulics", Pitman, p. 169 pour les seuils et p. 266 pour les vannes.

2. Mahmood K., Yevjevich V., 1975, "Unsteady flow in open channels, Volume 1 and 2", Water resources publications, Fort Collins, USA, 923 p.

tion des lois classiques prenant en considération les différentes conditions d'écoulement : noyé, dénoyé, à surface libre et en charge tout comme les équations CEM88(D) : Déversoir / Orifice (pelle importante) et CEM88(V) : Déversoir / Vanne de fond (pelle faible). Cependant contrairement à ces équations, celle-ci n'assure aucune continuité entre les conditions d'écoulement à surface libre et en charge. Cela peut entraîner des problèmes de calcul au voisinage de cette transition.

Cette loi est adaptée pour un seuil rectangulaire à crête épaisse, éventuellement associée à une vanne. Le coefficient de débit par défaut $C_d = 1$ correspond aux coefficients de débits suivant pour les équations classiques :

- $C_d = 0.385$ pour le seuil dénoyé.
- $C_d = 1$ pour le seuil noyé.
- $C_d = 1$ pour la vanne noyée.
- $C_c = 0.611$ pour la vanne dénoyée avec C_d calculé à partir de C_c (Voir ci-dessous).

Une modification du coefficient de débit modifiera proportionnellement les coefficients ci-dessus.

4.4.13.1 Détection du régime noyé / dénoyé

Le régime d'écoulement est dénoyé lorsque la hauteur d'eau à l'aval est inférieure à la hauteur critique :

$$(Z_2 - Z_{dv}) < \frac{2}{3}(Z_1 - Z_{dv})$$

avec Z_1 la cote de l'eau à l'amont, Z_2 la cote de l'eau à l'aval, et Z_{dv} la cote de radier de l'ouvrage.

4.4.13.2 Détection de l'écoulement en charge ou à surface libre

On considère ici que la hauteur d'eau au niveau de la vanne quand celle-ci est ouverte est égale à :

- la hauteur critique dans le cas d'un régime dénoyé :
- la hauteur d'eau aval dans le cas d'un régime noyé.

L'écoulement se met en charge à partir du moment où la pelle de la vanne touche la surface de l'eau à cet endroit.

En régime dénoyé, l'écoulement est donc en charge quand :

$$W \leq \frac{2}{3}(Z_1 - Z_{dv})$$

En régime noyé, la condition devient :

$$W \leq Z_2$$

4.4.13.3 Equations de débit

L'équation de la vanne dénoyée utilise un coefficient de contraction C_c fixe avec :

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+C_c W/h_1}}$$

Pour tous les autres régimes d'écoulement les équations utilisées sont les suivantes telles qu'elles peuvent être indépendamment utilisées :

	Surface libre (seuil rectangulaire)	En charge (orifice rectangulaire)
Dénoyé	Seuil dénoyé	Vanne dénoyée
Noyé	Seuil noyé	Vanne noyée

4.4.14 Vanne dénoyée

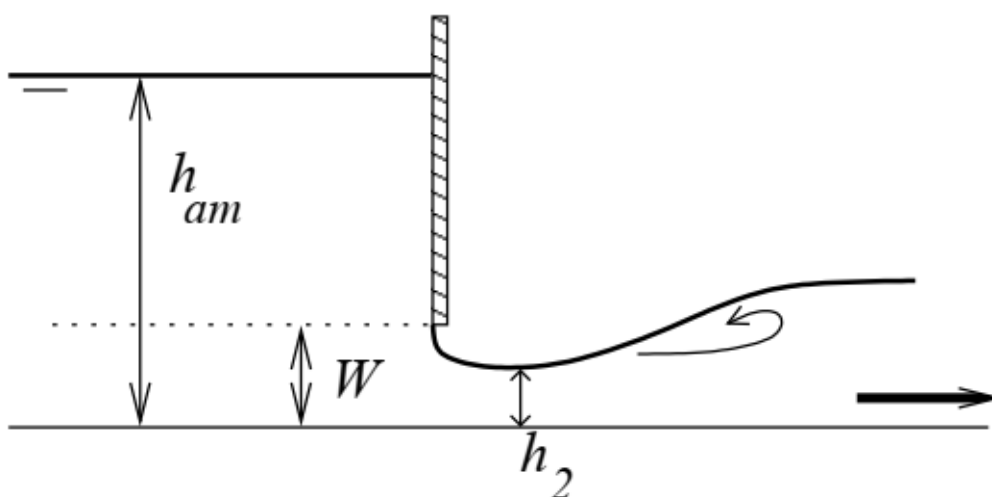


FIGURE 4.21 – Schéma vanne dénoyée

Extrait de Baume, J.-P., Belaud, G., Vion, P.-Y., 2013. *Hydraulique pour le génie rural, Formations de Master, Mastère Spécialisé, Ingénieur agronome*. UMR G-EAU, Irstea, SupAgro Montpellier.

W est l'ouverture de la vanne, h_1 la hauteur d'eau à l'amont et L la largeur de la vanne. L'équation de la vanne dénoyée s'obtient à partir de la relation de Bernoulli de conservation de la charge entre l'amont de la vanne et la section contractée.

La hauteur h_2 correspond à la section contractée et est égale à $C_c W$ où C_c est le coefficient de contraction. On exprime souvent l'équation de la vanne dénoyée en fonction d'un coefficient de débit sous la forme :

$$Q = C_d L W \sqrt{2g} \sqrt{h_1}$$

Ainsi, on a la relation entre C_d et C_c :

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+C_c W/h_1}}$$

De nombreuses expériences ont été faites pour évaluer C_d , qui varie peu autour de 0.6. En première approximation, pour W/h_1 faible (vanne de fond, cas le plus classique), C_d est proche de C_c et peut être pris égal à 0.6.

Les coefficients de débit C_d sont donnés par des abaques, que l'on trouvera dans des ouvrages spécialisés si besoin. Ils sont de l'ordre de 0.5 à 0.6 pour une vanne verticale, de 0.6 à 0.7 pour une vanne radiale, jusqu'à 0.8 pour une vanne inclinée par rapport à la verticale.

4.4.15 Vanne noyée

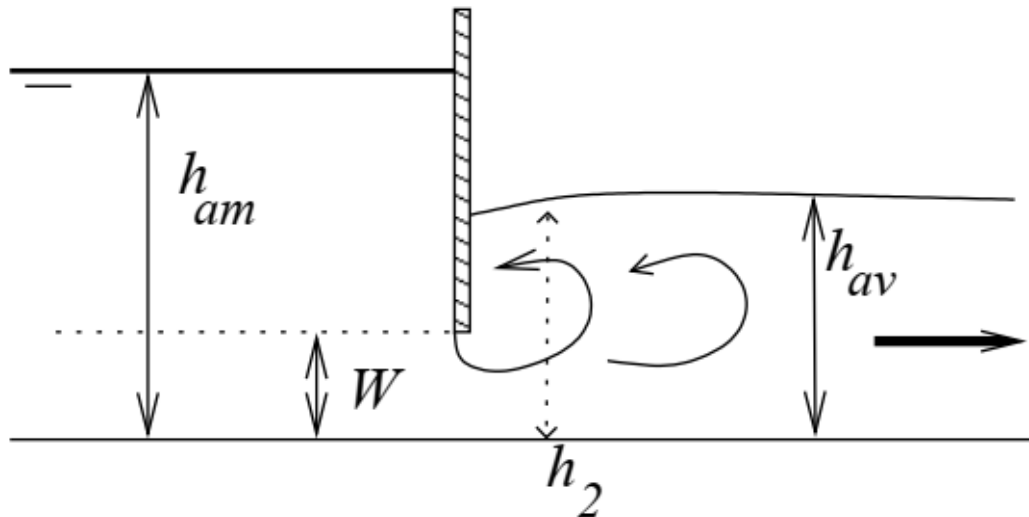


FIGURE 4.22 – Schéma vanne noyée

Extrait de Baume, J.-P., Belaud, G., Vion, P.-Y., 2013. *Hydraulique pour le génie rural, Formations de Master, Mastère Spécialisé, Ingénieur agronome*. UMR G-EAU, Irstea, SupAgro Montpellier.

4.4.15.1 Équation de la vanne noyée

$$Q = C'_d L W \sqrt{2g} \sqrt{h_1 - h_2}$$

Le coefficient C'_d est de l'ordre de 0.8.

4.4.16 Villemonte 1947

L'équation "Villemonte (1947)" utilise l'équation du seuil dénoyé auquel s'applique le coefficient de noyage proposé par Villemonte (cf. explications ci-dessous). Ce coefficient de noyage est aussi utilisé pour les formules de seuil triangulaire et seuil triangulaire tronqué.

Extrait de CETMEF, 2005

Pour une cote de l'eau aval supérieure à la cote de la crête du déversoir, l'écoulement est noyé et un coefficient de noyage s'applique sur le coefficient de débit.

Villemonte propose la formule suivante :

$$K = \frac{Q_{\text{noyé}}}{Q_{\text{dénoyé}}} = \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n \right]^{0.385}$$

Avec :

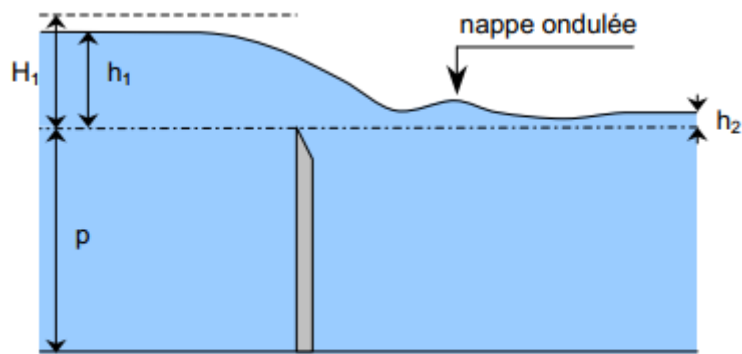


Figure 36 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé

FIGURE 4.23 – Formule de Villemonte : schéma seuil noyé

- h_1 , la hauteur d'eau amont au dessus de la crête du déversoir
- h_2 , la hauteur d'eau aval au dessus de la crête du déversoir
- n , l'exposant dans les relations d'écoulement dénoyé (rectangulaire=1.5, triangulaire=2.5, parabolique=2)

4.4.16.1 Références

CETMEF. Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Compiègne : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, 2005. http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0513410/notice-sur-les-deversoirs-synthese-des-lois-d-ecoulement-au-droit-des-seuils-et-deversoirs

Villemonte, J.R., 1947. Submerged weir discharge studies. Engineering news record 866, 54–57.

5 Passes à bassins

5.1 Passes à bassins : Chute

Cet outil est une aide au prédimensionnement d'une passe à bassins : il permet de calculer la valeur manquante des trois grandeurs :

- la cote amont (Z_1) en m ;
- la cote aval (Z_2) en m ;
- la chute (ΔH) en m ;

5.1.1 Formule

$$\Delta H = Z_1 - Z_2$$

5.2 Passes à bassins : Nombre de chutes

Cet outil est une aide au prédimensionnement d'une passe à bassins : il permet de calculer la valeur manquante des trois grandeurs :

- la chute totale (ΔH_T) en m ;
- la chute entre les bassins (ΔH) en m ;
- le nombre de chutes (N) ;

ainsi que la chute résiduelle (ΔH_R) en m.

5.2.1 Formule

$$\Delta H_T = (\Delta H * N) + \Delta H_R$$

5.3 Passes à bassins : Puissance dissipée

Cet outil est une aide au prédimensionnement d'une passe à bassins : il permet de calculer la valeur manquante des quatre grandeurs :

- la chute entre les bassins (ΔH) en m ;

- le débit (Q) en m³/s ;
- le volume des bassins (V) en m³ ;
- la puissance volumique dissipée (P_v) en W/m³.

La formule de calcul de la puissance dissipée est alors :

$$P_v = \frac{\rho g Q \Delta H}{V}$$

avec :

- ρ : la masse volumique de l'eau ;
- g : l'accélération de la gravité terrestre = 9,81 m.s⁻²

5.4 Passes à bassins : Dimensions

Cet outil est une aide au dimensionnement des bassins d'une passe : il permet de calculer la valeur manquante des quatre grandeurs :

- le volume d'eau (V) en m³ ;
- le tirant d'eau moyen (Y_{moy}) en m ;
- la longueur du bassin (L) en m ;
- la largeur du bassin (B) en m.

Le calcul est effectué en appliquant la formule :

$$V = Y_{moy} \times L \times B$$

5.5 Cloisons

Cet outil qui est similaire à celui des Lois d'ouvrages, est une aide au prédimensionnement hydraulique d'une passe à bassins : il est utilisé le plus souvent pour le dimensionnement des échancrures, fentes, orifices caractérisant les cloisons d'une passe ainsi que pour le calage en altitude des échancrures, fentes et radier du bassin amont d'une passe.

Il permet de calculer la valeur manquante des 7 valeurs caractérisant la chute, la surface de l'orifice noyé, la largeur de la fente, la charge sur la fente, la largeur de l'échancrure, la charge sur l'échancrure et le débit.

Les données à fournir obligatoirement sont les dimensions des bassins (largeur et longueur) ainsi que le tirant d'eau moyen en mètres. Ces données associées à la chute entre bassins permettent de calculer la puissance volumique dissipée.

Une fois le calcul de la cloison effectué, l'outil propose de créer une passe à bassin à partir de cette cloison en précisant, la cote amont de l'eau, le nombre de chute et la cote aval de l'eau de la passe.

5.5.1 Ouvrages hydrauliques pouvant constituer la cloison

L'outil permet de placer un ou plusieurs ouvrages en parallèle parmi les types d'ouvrages suivants :

5.5.1.1 Orifice noyé

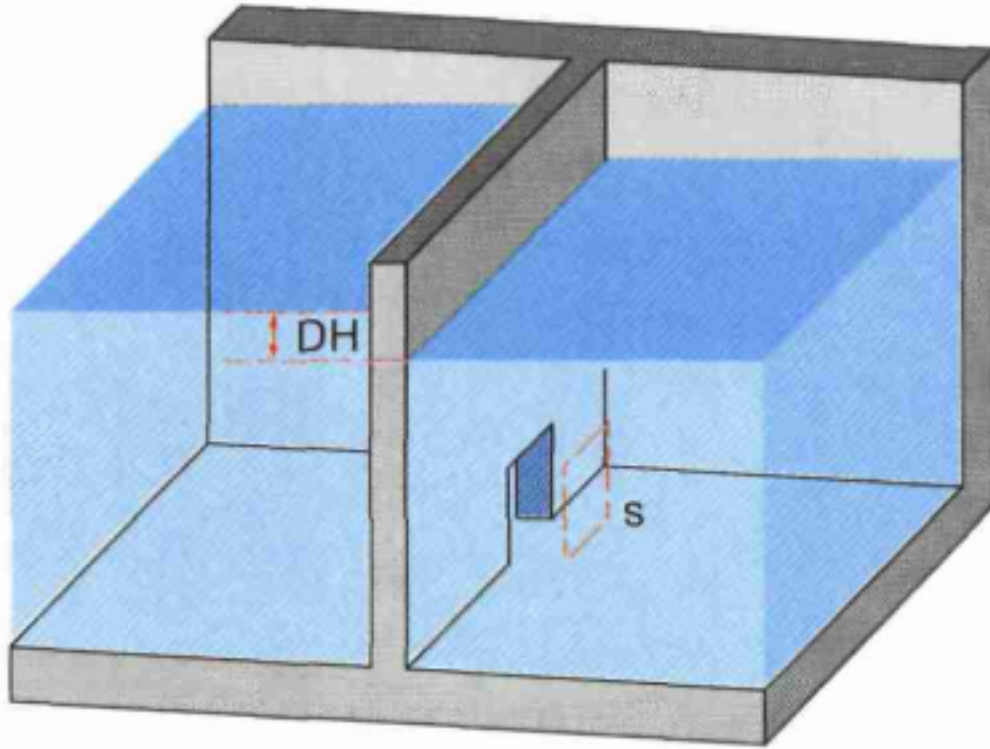


FIGURE 5.1 – Schéma orifice noyé

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation de l'orifice noyé est décrite sur la page de la formule de l'orifice noyé.

5.5.1.2 Fente noyée

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation de la fente noyée est décrite sur la page de la formule de la fente noyée.

5.5.1.3 Echantreuse

Extrait de Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., Gosset, C., 1992. Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. CSP. (page 94)

L'équation utilisée pour l'échantreuse est celle de Kindsvater-Carter et Villemonte.

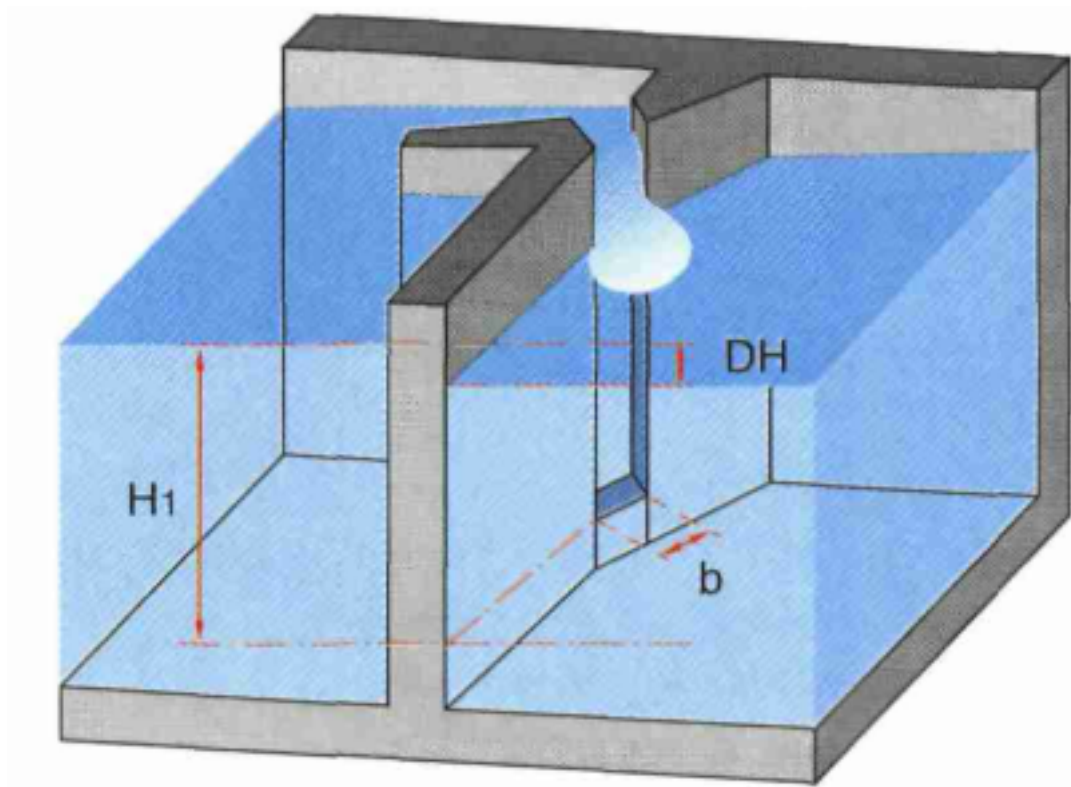


FIGURE 5.2 – Schéma de la fente noyée

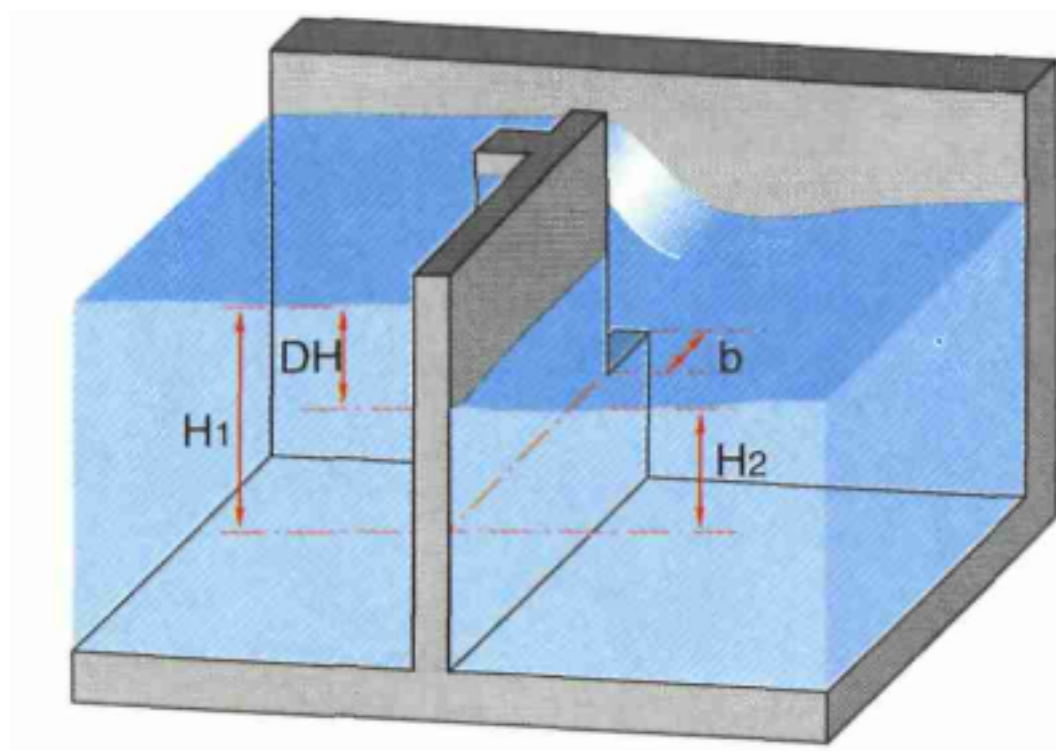


FIGURE 5.3 – Schéma de l'échancrure

5.6 Passe à bassins

5.6.1 Présentation générale

Ce module calcule la ligne d'eau d'une passe à bassins successifs. Deux possibilités de calcul sont offertes : calcul du débit entrant dans la passe connaissant les cotes amont et aval de l'eau, calcul de la cote amont de l'eau connaissant le débit entrant dans la passe.

La création d'une passe peut se faire ex-nihilo ou à partir d'un modèle de cloison créé avec l'outil Cloisons.

La saisie des paramètres de la passe comporte deux parties :

- Les paramètres hydrauliques qui comprennent les conditions aux limites (cote de l'eau à l'amont et à l'aval de la passe) et le débit entrant dans la passe
- Les paramètres des bassins qui comprennent la géométrie des bassins et les paramètres des ouvrages hydrauliques constituant les cloisons.

Il est possible de faire varier un ou deux paramètres hydraulique de façon à obtenir une série de résultats pour plusieurs conditions aux limites ou plusieurs débits.

5.6.2 Saisie de la géométrie de la passe

Le tableau de la géométrie comporte une ligne par bassin et une ligne finale pour décrire la cloison aval. Pour chaque bassin, les paramètres présents sont :

- longueur du bassin (m)
- largeur du bassin (m)
- débit d'attrait (m³/s)
- Cote de radier mi-bassin (m)
- Cote du radier amont (m)

A ceux-ci s'ajoute les paramètres des ouvrages de la cloison amont du bassin.

5.6.2.1 Modification de la structure de la passe

La structure de la passe, c'est-à-dire, le nombre de bassins ou le nombre d'ouvrages d'une cloison peuvent être modifiés à l'aide de la barre d'outil située en haut à droite du tableau :

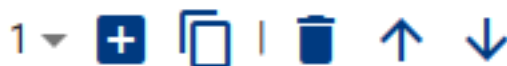


FIGURE 5.4 – Barre d'outil d'édition de la géométrie de la passe à bassins

Cette barre s'active lorsque on sélectionne :

- un bassin (qui comprend sa cloison amont) ou la cloison aval en cliquant sur la première colonne d'une ligne
- un ouvrage en cliquant sur une cellule non éditée d'un ouvrage d'une cloison
- tous les ouvrages d'une colonne du tableau en cliquant sur l'entête de la colonne à sélectionner

Il est aussi possible d'étendre une sélection existante en pressant la touche Ctrl] pour ajouter un nouvel élément à la sélection, ou en pressant la touche [MAJ] pour étendre la sélection entre deux lignes ou deux colonnes.

En fonction des éléments sélectionnés dans le tableau, la barre d'outil indique si les actions proposées s'appliqueront sur les bassins ou les ouvrages sélectionnés.

La barre d'outils est constituée des boutons suivants :

1. Nombre de bassin ou d'ouvrage à ajouter ou à dupliquer
2. Ajouter n bassins ou n ouvrages avec n le nombre indiqué sur le premier bouton
3. Dupliquer n bassins ou n ouvrages avec n le nombre indiqué sur le premier bouton
4. Supprimer les bassins ou ouvrages sélectionnés
5. Déplacer vers le haut (resp. la gauche), les bassins (resp. les ouvrages) sélectionnés
6. Déplacer vers le bas (resp. la droite), les bassins (resp. les ouvrages) sélectionnés

5.6.2.2 Modification avancée de la géométrie de la passe

La sélection des bassins ou des ouvrages donne accès à un bouton "Modifier les valeurs" qui permet de modifier un paramètre parmi toutes les variables des cellules sélectionnées dans le tableau de géométrie.

Pour cette variable à modifier, on pourra :

- définir une valeur fixe ;
- appliquer un delta ;
- calculer une interpolation entre le bassin sélectionné à l'amont et celui à l'aval.

5.6.2.3 La cloison aval

La cloison aval, en plus des lois d'ouvrages disponibles sur les cloisons, permet l'utilisation d'une "vanne levante" qui se présente sous la forme de deux lois :

- Échancrure régulée (Villemonthe 1957) ;
- Fente noyée régulée (Larinier 1992).

La vanne levante est un ouvrage où la cote de crête du seuil est régulée pour conserver une chute d'eau de consigne entre le dernier bassin et le cours d'eau à l'aval. En plus des paramètres classiques des lois de débit, il comporte :

- une chute DH de consigne (m)
- une cote minimale de la crête du seuil $minZDV$ (m) ;
- une cote maximale de la crête du seuil $maxZDV$ (m) ;

Lors du calcul, si la cote calculée pour la crête du seuil est inférieur à $minZDV$ (resp. supérieure à $maxZDV$) celle-ci est bloquée à $minZDV$ (resp. à $maxZDV$) et un avertissement apparaît dans le journal de calcul.

5.6.3 Résultats du calcul

Les résultats se présentent sous la forme d'un tableau récapitulatif des calculs hydrauliques pour tous les bassins et cloisons. On y retrouve toutes les données calculées par les modules [Cloisons et Puissance dissipée].

Deux graphiques sont présents :

- Un profil en long de la passe avec la cote de radier des bassins et la cote de l'eau dans chaque bassin.
- Un graphique général permettant de sélectionner n'importe quel paramètre du tableau de résultat en abscisse et en ordonnée.

Si plusieurs résultats sont disponibles du fait de la variation d'un ou deux paramètres hydrauliques de la passe, toutes les lignes d'eau calculées s'affichent dans le profil en long, et une liste déroulante permet de sélectionner le résultat à afficher dans le tableau et le graphique généraliste.

5.6.4 Session exemple

Un exemple de conception de passe à bassins peut être directement chargée via ce [lien](#).

5.7 Pré-barrages

Les pré-barrages sont un type de passe à bassins utilisés pour le franchissement d'obstacles de faible hauteur. Ils sont constitués de plusieurs murs ou seuils fractionnant la chute en plusieurs grands bassins en parallèle et en série.

5.7.1 Présentation générale

Ce module calcule la distribution des débits et la ligne d'eau des bassins d'un pré-barrage. Deux possibilités de calcul sont offertes : calcul du débit entrant dans la passe connaissant les cotes amont et aval de l'eau, calcul de la cote amont de l'eau connaissant le débit entrant dans la passe et le niveau d'eau à l'aval du pré-barrage.

La saisie des paramètres du pré-barrage comporte deux parties :

- La composition du pré-barrage en bassins et les cloisons faisant communiquer les bassins, sur la première partie de l'écran
- La saisie des paramètres du pré-barrage : conditions aux limites, paramètres des bassins et paramètres des cloisons, sur la deuxième partie de l'écran

Il est possible de faire varier n'importe quels paramètres de façon à obtenir une série de résultats.

Le schéma de la composition du pré-barrage est affichable en plein écran et exportable au format image PNG.

5.7.2 Composition du pré-barrage

À sa création, le pré-barrage est constitué d'une condition limite amont, d'un bassin, d'une condition limite aval et de cloisons joignant ces trois éléments.

Les boutons "Ajouter un bassin" et "Ajouter une cloison" permettent d'ajouter respectivement un bassin et une cloison au pré-barrage. À l'ajout d'une cloison, il est demandé à

quels conditions limites ou bassins la cloison est reliée. La saisie des liaisons avec les cloisons oblige l'utilisateur à suivre la numérotation des bassins qui respecte nécessairement un ordre amont-aval.

Une barre d'outil permet de dupliquer et effacer une cloison ou un bassin sélectionné et de changer l'ordre d'un bassin.

5.7.3 Saisie des paramètres des éléments du pré-barrage

La saisie des paramètres de condition limite amont ou aval, d'un bassin ou d'une cloison s'effectue en sélectionnant l'élément voulu dans le schéma en première partie d'écran.

La saisie des éléments s'effectue ensuite comme pour tout module de Cassiopée. Pour la saisie des cloisons, se référer au module lois d'ouvrages.

5.7.4 Lancement du calcul

Le bouton calculer s'active à partir du moment où tous les bassins sont connectés par des cloisons de l'amont jusqu'à l'aval du pré-barrage et où tous les paramètres ont été saisis.

5.7.5 Visualisation des résultats

Après le calcul, l'interface fait apparaître deux onglets "Données" et "Résultats" qui permettent de naviguer entre la saisie du pré-barrage et les résultats du calcul.

Si le calcul produit une série de résultats, une liste déroulante permet de choisir quel résultat afficher pour chaque paramètre ayant varié.

La première partie de l'écran montre un synoptique du pré-barrage avec les débits et les chutes au niveau des cloisons, la puissance moyenne dissipée et la profondeur moyenne au niveau des bassins, et le débit et les cotes de l'eau aux conditions limites amont et aval. Pour afficher les résultats chiffrés au niveau des bassins, l'utilisateur doit cliquer sur un des ces éléments sur le schéma. Pour afficher les résultats chiffrés au niveau d'une cloison, cliquer sur la cloison correspondante sur le schéma.

Un bouton "Exporter tous les résultats" permet de récupérer un tableau au format Excel comprenant les résultats des conditions limites, des bassins et des cloisons pour toute la série de calcul.

5.8 Passe « naturelle » à enrochements en rangées périodiques

Il est indiqué en p.16 du guide de conception des passes naturelles (Larinier et al., 2006)¹ que les passes en enrochements en rangées périodiques s'apparentent aux passes à bassins et leurs critères de conception sont identiques à ces dernières.

1. Larinier, Michel, Dominique Courret, et Peggy Gomes. 2006. « Guide technique pour la conception des passes à poissons "naturelles" ». Rapport GHAPPE RA. Compagnie Nationale du Rhône / Agence de l'Eau Adour Garonne. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1834.8562>.

Il est donc possible d'utiliser les différents outils du module « passe à bassins » pour concevoir ce type de dispositif. Notamment, l'outil « cloisons » permet de renseigner les différentes caractéristiques dimensionnelles des déversoirs (largeurs, cotes déversantes) et des pseudo-bassins (longueurs, largeurs, cote mi-radier), qui permettent de retrouver indirectement les paramètres hauteurs de seuils (p) et hauteurs utiles des blocs (k) dans le tableau de géométrie généré. La porosité (rapport entre le passage libre entre les blocs et la largeur totale de la pseudo-cloison) n'est pas renseignée directement, mais ce paramètre peut être déduit et examiné par ailleurs si besoin.

Selon ce principe, chaque portion déversante de la cloison doit être renseignée en tant qu'échancrure ou fente, de même que la cote du sommet des blocs si ces derniers sont ennoyé sur la plage de fonctionnement du dispositif. Pour les échancrures, il convient de porter une attention particulière au type seuil (épais ou mince) afin de bien retranscrire les conditions d'ennoisement par l'aval du déversoir le cas échéant.

Il est également possible d'utiliser l'outil « pré-barrages » (les équations implémentées sont les mêmes que dans l'outil « cloisons »), si le dispositif est concerné par des modes alimentations complexes, avec par exemple des déversés du seuil vers différents bassins du dispositif (cas moins fréquent pour une passes en enrochements en rangées périodiques).

Un exemple de passe est directement accessible via [ce lien](#).

6 Passes à macro-rugosité

6.1 Passe à macro-rugosités

Le module de calcul passe à macro-rugosités permet de calculer les caractéristiques d'une passe à macro-rugosités constituée de blocs uniformément répartis avec des espacements transversaux ax et longitudinaux ay égaux.

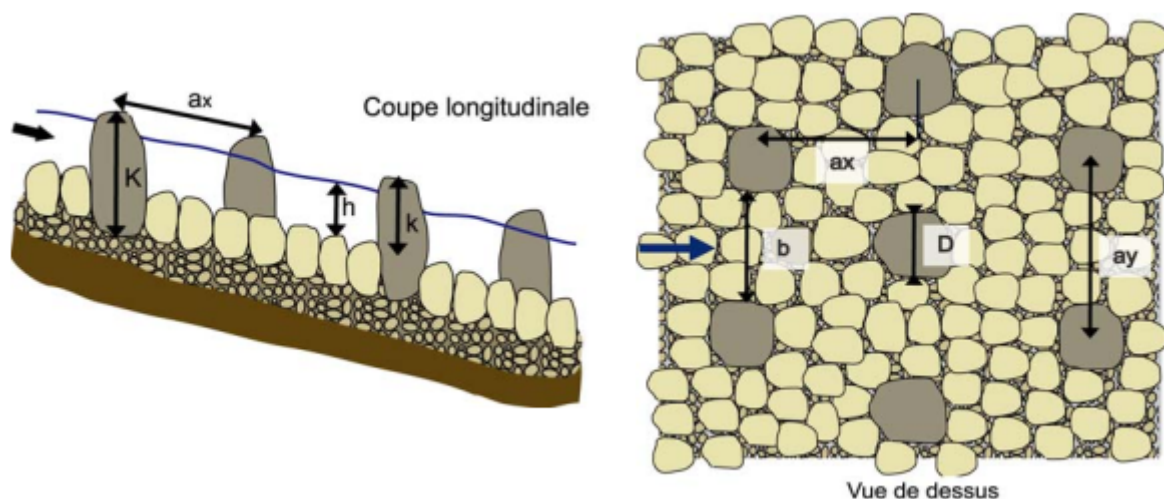


FIGURE 6.1 – Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations

Extrait de Larinier et al., 2006

L'outil permet de calculer l'une des valeurs suivantes :

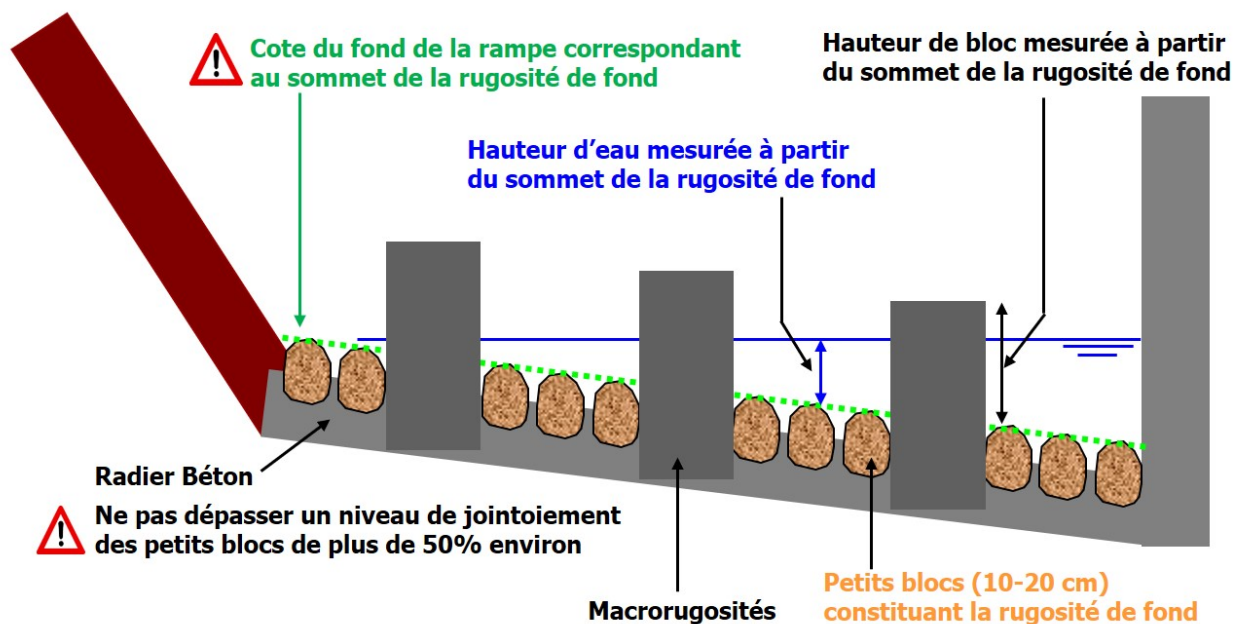
- La largeur de la passe (m) ;
- La pente de la passe (m) ;
- Le débit (m³/s) ;
- La profondeur h (m) ;
- La concentration des blocs C .

Il nécessite d'entrer les valeurs suivantes :

- La cote de fond amont (m) ;
- La longueur de la passe (m) ;
- La rugosité de fond (m) ;
- La largeur des blocs D face à l'écoulement (m) ;
- La hauteur utile des blocs k (m) ;
- Le coefficient de trainée d'un bloc (1 pour rond, 2 pour carré).

6.2 Rugosité de fond

Coupe transversale schématisique d'une rampe à macrorugosités avec dévers latéral



6.2.1 Références

Larinier, Michel, Courret, D., Gomes, P., 2006. Guide technique pour la conception des passes à poissons "naturelles," Rapport GHAPPE RA. Compagnie Nationale du Rhône / Agence de l'Eau Adour Garonne. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1834.8562>

6.3 Calcul du débit d'une passe à macro-rugosité

Le calcul du débit d'une passe à macro-rugosité correspond à l'implémentation de l'algorithme et des équations présentés dans Cassan et al. (2016).

6.3.1 Principe général du calcul

Extrait de Cassan et al., 2016

Il existe trois cas :

- le cas submergé quand $h \geq 1.1 \times k$
- le cas émergent quand $h \leq k$
- le cas quasi-émergent pour $k < h < 1.1 \times k$

Dans le cas quasi-émergent, le calcul du débit correspond à une transition entre les formules cas émergent et cas submergé :

$$Q = a \times Q_{submerge} + (1 - a) \times Q_{emergent}$$

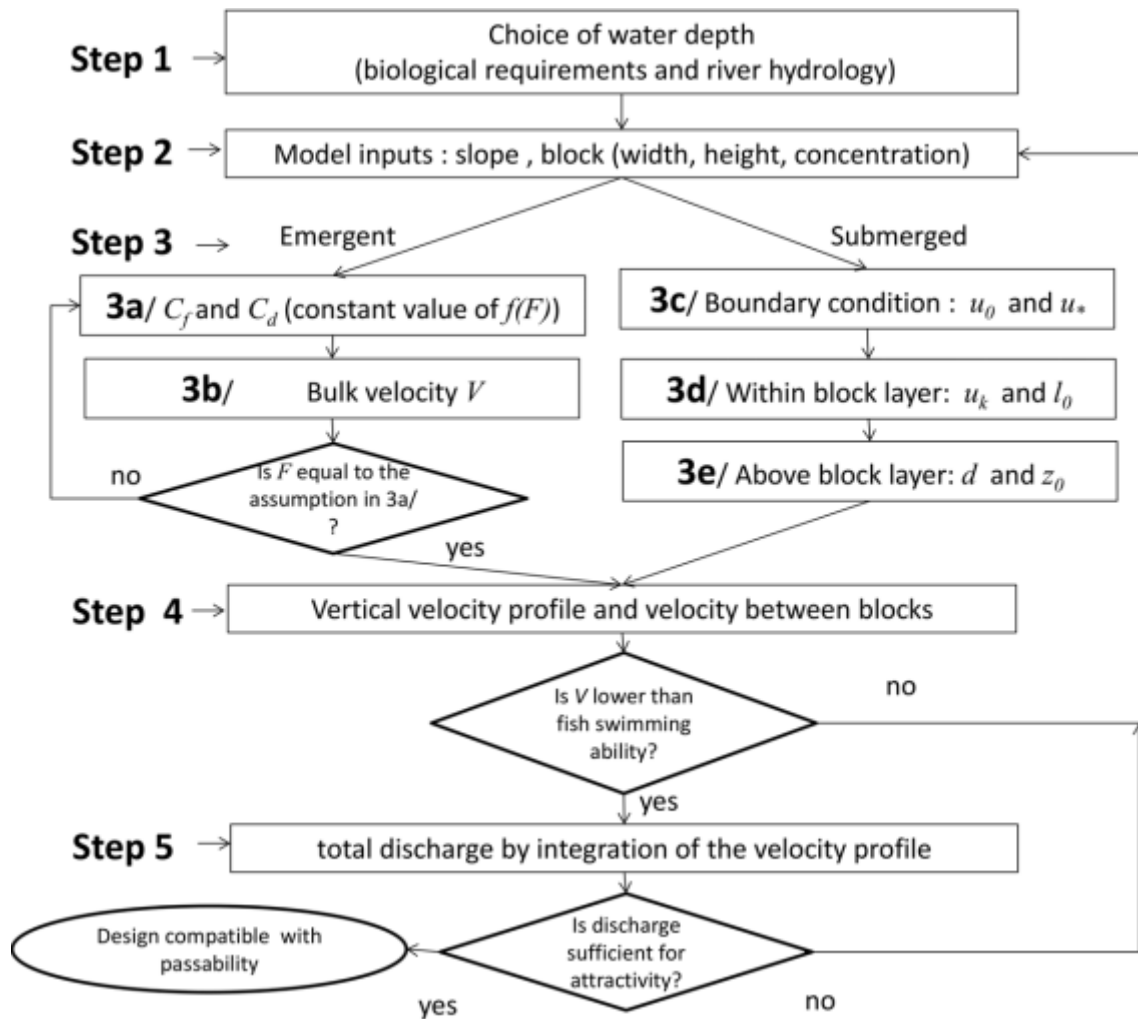


FIGURE 6.2 – Organigramme de la méthode de calcul

avec $a = \frac{h/k - 1}{1.1 - 1}$

6.3.2 Cas submergé

Le calcul se fait en intégrant le profil de vitesse dans et au-dessus des macrorugosités. Les vitesses calculées sont les moyennes temporelles et spatiales par plan parallèle au fond.

Dans les macrorugosités, les vitesses sont obtenues par la double moyenne des équations de Navier-Stokes en régime uniforme avec un modèle de longueur de mélange pour la turbulence.

Au dessus des macrorugosités, l'analyse classique de couche limite turbulente est maintenue. Le profil de vitesse est continu au sommet des macrorugosités et ce dernier dépend des conditions aux limites fixées par l'hydraulique :

- vitesse au fond (sans turbulence) en m/s :

$$u_0 = \sqrt{2gSD(1 - \sigma C)/(C_d C)}$$

- contrainte de cisaillement totale au sommet des rugosités en m/s :

$$u_* = \sqrt{gS(h - k)}$$

La vitesse moyenne du lit est donnée par intégration des débits entre et au-dessus des blocs :

$$\bar{u} = \frac{Q_{inf} + Q_{sup}}{h}$$

avec respectivement Q_{inf} et Q_{sup} les débits unitaires pour la partie dans la canopée et la partie au dessus de la canopée.

6.3.2.1 Calcul du débit unitaire Q_{inf} dans la canopée

Le débit dans la canopée est obtenu par intégration du profil de vitesse (Eq. 9, Cassan et al., 2016) :

$$Q_{inf} = \int_0^1 u(\tilde{z}) d\tilde{z}$$

avec

$$u(\tilde{z}) = u_0 \sqrt{\beta \left(\frac{h}{k} - 1 \right) \frac{\sinh(\beta \tilde{z})}{\cosh(\beta)} + 1}$$

avec β^2 le ratio entre les forces trainée et de turbulence (Cassan et al., 2016, Eq. 8) :

$$\beta = \sqrt{(k/\alpha_t)(C_d C k/D)/(1 - \sigma C)}$$

avec :

$$C_d = C_x f_{h_*}(h_*)$$

et α_t obtenu à partir de la résolution de l'équation suivante :

$$\alpha_t u(1) - l_0 u_* = 0$$

avec

$$l_0 = \min(s, 0.15k)$$

avec

$$s = D \left(\frac{1}{\sqrt{C}} - 1 \right)$$

6.3.2.2 Calcul du débit unitaire Qsup au dessus de la canopée

$$Q_{sup} = \int_k^h u(z) dz$$

avec (Eq. 12, Cassan et al., 2016)

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)$$

avec (Eq. 14, Cassan et al., 2016)

$$z_0 = (k - d) \exp \left(\frac{-\kappa u_k}{u_*} \right)$$

et (Eq. 13, Cassan et al., 2016)

$$d = k - \frac{\alpha_t u_k}{\kappa u_*}$$

ce qui donne

$$Q_{sup} = \frac{u_*}{\kappa} \left((h - d) \left(\ln \left(\frac{h - d}{z_0} \right) - 1 \right) - \left((k - d) \left(\ln \left(\frac{k - d}{z_0} \right) - 1 \right) \right) \right)$$

6.3.3 Cas émergent

Le calcul du débit se fait par itérations successives qui consistent à trouver la valeur de débit permettant d'obtenir l'égalité entre la vitesse débitante V et la vitesse moyenne du lit donnée par l'équilibre des forces de frottements (fond + traînée) avec la gravité :

$$u_0 = \sqrt{\frac{2gSD(1 - \sigma C)}{C_d f_F(F) C(1 + N)}}$$

avec

$$N = \frac{\alpha C_f}{C_d f_F(F) C h_*}$$

avec

$$\alpha = 1 - (a_y/a_x \times C)$$

6.3.4 Formules utilisées

6.3.4.1 Vitesse débitante V

$$V = \frac{Q}{B \times h}$$

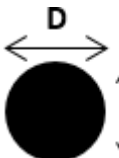
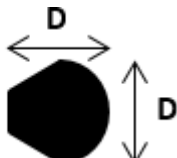
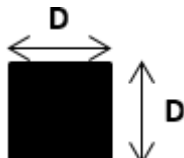
6.3.4.2 Vitesse moyenne entre les blocs V_g

Eq. 1 Cassan et al (2016) et Eq. 1 Cassan et al (2014) :

$$V_g = \frac{V}{1 - \sqrt{(a_x/a_y)C}}$$

6.3.4.3 Coefficient de trainée d'un bloc C_{d0}

C_{d0} est le coefficient de trainée théorique d'un bloc de hauteur infinie pour un Froude $F \ll 1$ (Cassan et al, 2014).

Forme du bloc	Cylindre	Forme "face arrondie"	Parallélépipède à base carré	Forme "face plate"
				
Valeur de C_{d0}	1.0	1.2-1.3	2.0	2.2

Lors de l'établissement des formules statistiques du guide technique de 2006 (Larinier et al. 2006), la définition des formes de blocs à tester a été établie dans la perspective de l'utilisation de blocs de carrière à faces ni complètement rondes, ni complètement carrées. La forme dite à « face arrondie » n'était ainsi pas complètement cylindrique, mais présentait une face aval trapézoïdale (vue en plan). De même, la forme dite à « face plane » ne présentait pas une section carrée, mais également une face aval trapézoïdale. Ces différences de forme entre la « face arrondie » et un véritable cylindre d'une part, et la « face plate » et un véritable parallélépipède à base carrée d'autre part, se traduisent par de légères différences entre celles-ci sur les coefficients de forme C_{d0} .

6.3.4.4 Coefficient de forme de bloc σ

Cassan et al. (2014), et Cassan et al. (2016) définit σ comme le ratio entre l'aire du bloc vu du dessus et D^2 . On a donc $\sigma = \pi/4$ pour un bloc circulaire et $\sigma = 1$ pour un bloc carré.

6.3.4.5 Rapport entre la vitesse moyenne à l'aval d'un bloc et la vitesse max r

Les valeurs de r dépendent de la forme des blocs (Cassan et al., 2014 et Tran et al. 2016) :

- rond : $r = 1.1$
- face arrondie : $r = 1.2$
- carré : $r = 1.5$
- face plate : $r = 1.6$

Cassiopée propose une formule de calcul en fonction de C_{d0} :

$$r = 0.4C_{d0} + 0.7$$

6.3.4.6 Froude F

$$F = \frac{V_g}{\sqrt{gh}}$$

6.3.4.7 Fonction de correction du coefficient de trainée liée au Froude $f_F(F,r)$

Si $F < 1$ (Eq. 19, Cassan et al., 2014) :

$$f_F(F) = \min \left(\frac{r}{1 - \frac{F_g^2}{4}}, \frac{1}{F^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

sinon $f_F(F) = 1$ car un écoulement torrentiel à l'amont des blocs est théoriquement impossible à cause du ressaut hydraulique provoqué par le bloc aval.

6.3.4.8 Vitesse maximale u_{max}

D'après l'équation 19 de Cassan et al., 2014 :

$$u_{max} = V_g \sqrt{f_F(F)}$$

6.3.4.9 Fonction de correction du coefficient de trainée lié à la profondeur relative $f_{h^*}(h^*)$

L'équation utilisée dans Cassiopée diffère légèrement de l'équation 20 de Cassan et al. 2014 et l'équation 6 de Cassan et al. 2016. Cette formule est un ajustement sur les mesures expérimentales sur les blocs circulaires utilisées dans de Cassan et al. 2016 :

$$f_{h^*}(h^*) = (1 + 1/h_*^2)$$

6.3.4.10 Coefficient de friction du lit C_f

Si $k_s < 10^{-6}m$ alors on utilise la formule de Blasius

$$C_f = 0.3164/4 * Re^{-0.25}$$

avec

$$Re = u_0 \times h/\nu$$

Sinon (Eq. 3, Cassan et al., 2016 d'après Rice et al., 1998)

$$C_f = \frac{2}{(5.1 \log(h/k_s) + 6)^2}$$

6.3.5 Notations

- α : ratio de l'aire concernée par la friction du lits sur $a_x \times a_y$
- α_t : échelle de longueur de la turbulence dans la couche des blocs(m)
- β : ratio entre la contrainte due à la trainée et la contrainte due aux turbulences
- κ : constante de Von Karman = 0.41
- σ : ratio entre l'aire du block dans le plan X,y et D^2
- a_x : largeur d'une cellule (perpendiculaire à l'écoulement) (m)
- a_y : longueur d'une cellule (parallèle à l'écoulement) (m)
- B : largeur de la passe (m)
- C : concentration de blocs
- C_d : coefficient de trainée d'un bloc dans les conditions d'écoulement actuel
- C_{d0} : coefficient de trainée d'un bloc considérant un bloc infiniment haut avec $F \ll 1$
- C_f : coefficient de friction du lit
- d : déplacement dans le plan zéro du profil logarithmique (m)
- D : largeur du bloc face à l'écoulement (m)
- F : nombre de Froude basé sur h et V_g
- g : accélération de la gravité = 9.81 m.s-2
- h : profondeur moyenne (m)
- h_* : profondeur adimensionnelle (h/D)
- k : hauteur utile des blocs (m)
- k_s : hauteur de la rugosité (m)
- l_0 : échelle de longueur de la turbulence au sommet des blocs (m)
- N : ratio entre la friction du lit et la force de trainée
- Q : débit (m3/s)
- S : pente de la passe (m/m)
- u_0 : vitesse moyenne dans le lit (m/s)
- u_* : vitesse de cisaillement (m/s)
- V : vitesse débitante (m/s)
- V_g : vitesse entre les blocs (m/s)
- s : distance minimale entre les blocs (m)
- z : position verticale (m)
- z_0 : rugosité hydraulique (m)
- $\tilde{z}$: position verticale adimensionnelle $\tilde{z} = z/k$

6.3.6 Références

Cassan L, Laurens P. 2016. Design of emergent and submerged rock-ramp fish passes. Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst., 417, 45. <https://doi.org/10.1051/kmae/2016032>

Cassan, L., Tien, T.D., Courret, D., Laurens, P., Dartus, D., 2014. Hydraulic Resistance of Emergent Macroroughness at Large Froude Numbers : Design of Nature-Like Fishpasses. Journal of Hydraulic Engineering 140, 04014043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000910](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000910)

Larinier, Michel, Courret, D., Gomes, P., 2006. Guide technique pour la conception des passes à poissons "naturelles," Rapport GHAPPE RA. Compagnie Nationale du Rhône / Agence de l'Eau Adour Garonne. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1834.8562>

Rice C. E., Kadavy K. C., et Robinson K. M., 1998. Roughness of Loose Rock Riprap on Steep Slopes. Journal of Hydraulic Engineering 124, 179-85. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:2\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(179))

Tran, T.D., Chorda, J., Laurens, P., Cassan, L., 2016. Modelling nature-like fishway flow around unsubmerged obstacles using a 2D shallow water model. *Environmental Fluid Mechanics* 16, 413–428. <https://doi.org/10.1007/s10652-015-9430-3>

6.4 Passe à macro-rugosités complexe

Ce module de calcul permet de calculer le débit transitant par une passe à macro-rugosité dite “complexe” car possédant un radier incliné ou de multiples radiers.

6.4.1 Caractéristiques générales

Les paramètres à rentrer sont les mêmes que pour la passe à macro-rugosité dite “simple”. Concernant le radier de la passe deux choix sont offerts :

- Les radiers multiples : il est possible de créer, dupliquer, supprimer, changer l'ordre d'autant de radiers que nécessaire. Pour chaque radier, les paramètres à rentrer sont : la largeur du radier et la cote du radier à l'amont de la passe.
- Le radier incliné : en plus de la largeur du radier, il faut entrer les cotes droite et gauche de radier à l'amont de la passe.

Les données calculées sont les mêmes que pour la passe à macro-rugosité dite “simple”. Les résultats affichent les différentes données pour chaque radier et le graphique permet de visualiser ces données pour chaque radier (profil transversal). Dans le cas où au moins un des paramètres de calcul varie, les résultats sont disponibles individuellement via une liste déroulante.

6.4.2 Cas du radier incliné

Le calcul d'une passe à radier incliné consiste à discrétiser la passe en plusieurs radiers horizontaux. La largeur des radiers créés est fixée à la distance séparant deux blocs avec un ajustement du radier le plus haut pour obtenir la largeur totale de la passe. Il est possible d'éditer les radiers créés en sélectionnant “Radiers multiples” après avoir effectué un calcul avec un radier incliné.

6.5 Concentration de blocs

Ce module permet de calculer la concentration de blocs uniformément répartis dans une passe à macro-rugosités.

L'outil permet de calculer l'une des valeurs suivantes :

- La largeur de la passe (m) ;
- Le nombre de blocs ;
- Le diamètre des blocs (m) ;
- La concentration des blocs C .

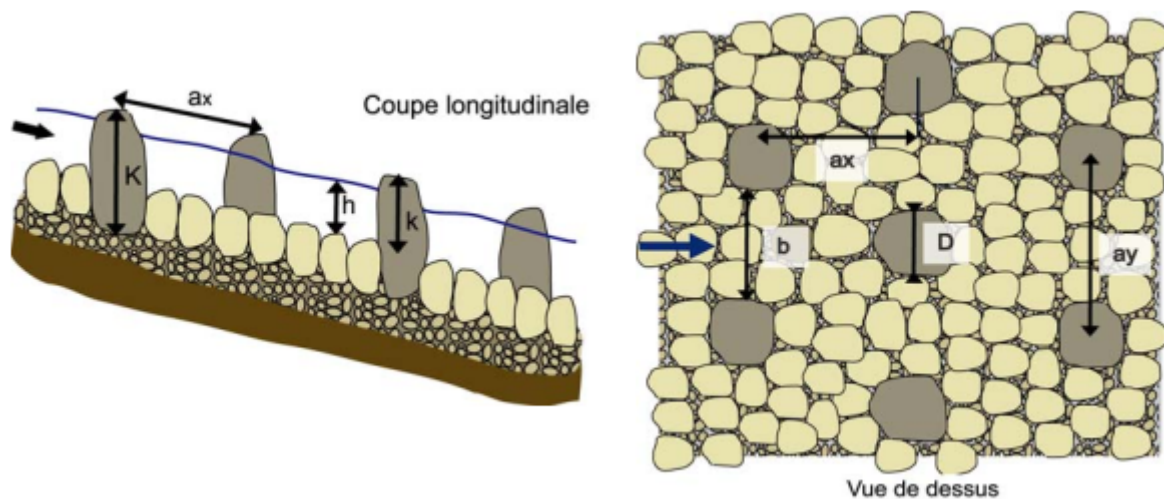


FIGURE 6.3 – Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations

6.5.1 Formule

Extrait de Larinier et al., 2006

L'espacement entre les blocs se calcule ensuite avec la formule suivante :

$$ax = ay = \frac{D}{\sqrt{C}}$$

Avec :

- ax et ay respectivement les distances longitudinales et latérales entre les centres des blocs (m) ;
- D la largeur des blocs face à l'écoulement (m) ;
- C la concentration des blocs (-).

Le nombre de blocs N pour une passe de largeur B s'obtient alors avec l'équation :

$$N = B/ax$$

6.5.2 Harmonisation

Lors du calcul du nombre de blocs, si celui-ci n'est pas entier, des nombres de blocs harmonisés à la hausse et à la baisse sont proposés accompagnés des valeurs de concentration correspondantes.

La tolérance est de l'ordre du centimètre.

6.5.3 Références

Larinier, Michel, Courret, D., Gomes, P., 2006. Guide technique pour la conception des passes à poissons "naturelles," Rapport GHAPPE RA. Compagnie Nationale du Rhône / Agence de l'Eau Adour Garonne. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1834.8562>

6.6 Courbe de remous d'une passe à macro-rugosité

Ce module permet de simuler la courbe de remous d'une passe à macro-rugosité dite "simple" afin de déterminer le niveau d'envoie aval de la passe.

6.6.1 Principe de fonctionnement

Les paramètres de ce module sont :

- Le choix parmi les modules présents dans la session de travail du module de passe à macro-rugosité dite "simple" qui sera utilisé pour effectuer le calcul
- La cote de l'eau à l'aval de la passe
- Le pas d'espace utilisé pour la discrétisation du calcul de la courbe.

N.B. : Comme le calcul de la courbe de remous ne peut se faire que pour un jeu de paramètres, le module de passe à macro-rugosité dite "simple" ne peut pas contenir de paramètres "variés".

Le calcul théorique effectué dans la passe à macro-rugosité correspond à un calcul de ligne d'eau en régime uniforme où la pente de l'eau est égale à la pente du fond de la passe. On utilise ici le module de passe à macro-rugosité pour calculer la pente de l'eau dans le cas non-uniforme. Le calcul de la courbe de remous fluviale s'effectue alors depuis la cote de l'eau imposée à l'aval à l'aide de la méthode d'intégration de trapèzes.

Ce module se base le module de calcul de courbe de remous d'une section paramétrée pour le calcul et l'affichage des résultats.

6.7 Passe à rugosités de fond

Les rampes à rugosités de fond sont généralement constituées de blocs de dimensions relativement uniformes disposés les uns contre les autres et formant un coursier de pente plus ou moins importante.

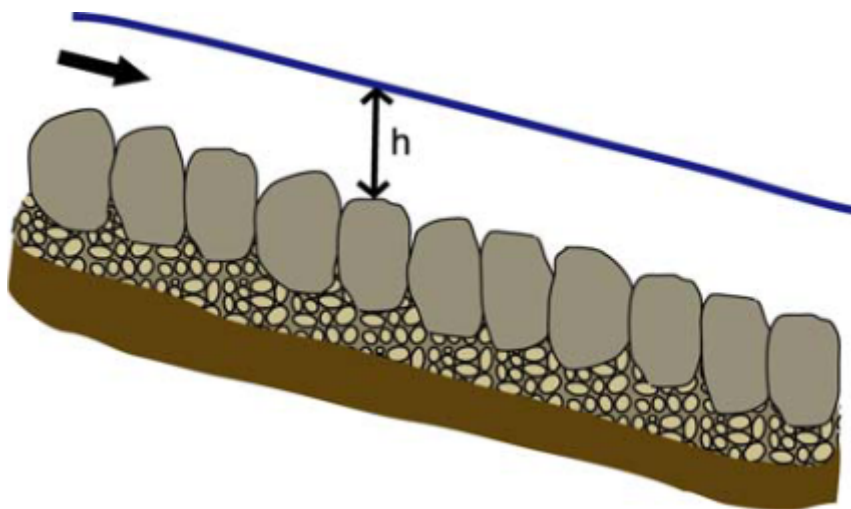


FIGURE 6.4 – Schéma coupe longitudinale d'une passe à rugosités de fond

6.7.1 Avertissement sur la franchissabilité de l'ouvrage

En l'absence de bassins et d'éléments protubérant dans l'écoulement, ces rampes ne présentent pas de zones de repos pour les poissons en montaison. Les poissons doivent ainsi les franchir d'une traite en utilisant généralement leur vitesse de nage maximale. La franchissabilité d'une rampe à rugosités de fond dépend des vitesses de l'écoulement, des hauteurs d'eau au dessus de la crête des enrochements, de la "qualité" de la lame d'eau (absence de ressauts et de décollement rendant la nage du poisson difficile, sinon impossible), mais aussi de la longueur de la rampe que les poissons doivent parcourir avant d'être fatigués. C'est pourquoi les rampes à rugosités de fond ne sont pas considérées comme des dispositifs de franchissement à proprement parler (Larinier et al. 2006). Ce type de dispositif peut être utile (1) pour rendre un seuil directement franchissable par les espèces aux meilleures capacités de nage (salmonidés, voire aloses et lamproies) ou (2) pour former des prébarrages associant des rampes courtes avec des chutes réduites et des bassins intermédiaires.

6.7.2 Méthode de calcul

6.7.2.1 Radier incliné

Le radier incliné est calculé en discrétisant la largeur de passe en plusieurs radiers horizontaux dont le nombre est déterminé par le paramètre "Nombre de tranches d'écoulement".

6.7.2.2 Relation entre la charge amont sur la crête et le débit

La relation entre la charge amont et le débit est représenté par une formule de déversoir dénoyé.

6.7.2.3 Relation entre la hauteur d'eau, la vitesse débitante et le débit en régime uniforme

A partir du débit fourni ou calculé en entrée de passe, la hauteur d'eau et la vitesse débitante dans la passe sont calculées avec la formule de Manning-Strickler en régime uniforme pour une section rectangulaire équivalente à celle de la passe.

Le coefficient de Strickler est évalué à partir du D_{65} des enrochements :

$$K_s = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$$

Avec a le **coefficient correcteur du Strickler** fonction du mode de mise en place des enrochements et de leur niveau de jointement (Larinier et al., 2006) :

- enrochements déversés, non jointoyés : 21
- enrochements disposés de manière compacte sans jointoiement : 15.5
- jointoiement à 30% : 16.7
- jointoiement à 50% : 18

6.7.3 Références

Larinier, M., J. Chorda, et O. Ferlin. 1995. « Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs : étude expérimentale ». GHAAPPE 95/05-HYDRE 161. irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02575575>.

Larinier, Michel, Dominique Courret, et Peggy Gomes. 2006. « Guide technique pour la conception des passes à poissons “naturelles” ». Rapport GHAPPE RA. Compagnie Nationale du Rhône / Agence de l'Eau Adour Garonne. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1834.8562>.

7 Passes à ralentisseurs

7.1 Calage d'une passe à ralentisseurs

Ce module permet de dimensionner une passe à ralentisseur. Les types de passes à ralentisseurs supportés sont :

- passes à ralentisseurs plans ;
- passes à ralentisseurs "Fatou" ;
- passes à ralentisseurs à fonds suractifs ;
- passes à ralentisseurs mixtes.

Voir l'ensemble des formules utilisées pour les passes à ralentisseurs.

7.1.1 Calage hydraulique de la passe

L'outil permet de calculer l'une des valeurs suivantes :

- le débit passant dans la passe (m^3/s) ;
- la charge en amont de la passe (m) ;
- la largeur de la passe (m) pour les types ralentisseurs plans et Fatou .

Compte tenu des paramètres obligatoires suivants :

- le type de passe (Plans, Fatou, fonds suractifs ou mixtes) ;
- la pente (m/m).

Le paramètre "Espacement entre les ralentisseurs (m)" est facultatif. S'il n'est pas renseigné, sa valeur standard est alors calculée. S'il est fourni, si sa valeur s'écarte de plus de 10% de la valeur standard, une erreur est générée.

7.1.2 Calage altimétrique de la passe

Les paramètres de calage altimétriques (cote de l'eau amont et cote de l'eau aval) sont facultatifs et permettent de calculer :

- la longueur longitudinale et au fil de l'eau de la passe
- le nombre de ralentisseurs
- les cotes de radier et de déversement à l'amont et à l'aval de la passe
- les cotes d'arase des murs latéraux à l'amont de la passe.

7.1.3 Génération d'un module de simulation de passe à ralentisseurs

Les résultats d'une passe calée en altimétrie peuvent servir à générer un module de simulation de passe à ralentisseurs à l'aide du bouton ad hoc.

7.2 Simulation d'une passe à ralentisseurs

Ce module permet de calculer différentes conditions hydrauliques sur une passe à ralentisseur dont la géométrie est connue. Cette géométrie provient de mesures topographiques ou du résultat d'un calage de passe à ralentisseurs.

Les types de passes à ralentisseurs supportés sont :

- passes à ralentisseurs plans ;
- passes à ralentisseurs "Fatou" ;
- passes à ralentisseurs à fonds suractifs ;
- passes à ralentisseurs mixtes.

Voir l'ensemble des formules utilisées pour les passes à ralentisseurs.

L'outil permet de calculer l'une des valeurs suivantes :

- le débit passant dans la passe (m^3/s) ;
- la cote de l'eau en amont de la passe (m) ;
- la cote de déversement en amont de la passe (m).

Compte tenu des paramètres obligatoires suivants :

- le type de passe (Plans, Fatou, fonds suractifs ou mixtes) ;
- la pente (m/m) ;
- la largeur de la passe (m) ;
- la cote de déversement ou la cote de radier à l'amont (m) ;
- la cote de déversement ou la cote de radier à l'aval (m) .

7.3 Formules de calcul des passes à ralentisseurs

Pour le calcul de :

- la charge amont h_a ;
- la hauteur d'eau dans la passe h ;
- du débit Q ;
- de la vitesse débitante V ;
- la cote de radier amont Z_{r1} ;
- la cote d'arase minimale des murs latéraux Z_m

Se référer aux formules propres à chaque type de passe à ralentisseurs :

- passes à ralentisseurs plans ;
- passes à ralentisseurs "Fatou" ;
- passes à ralentisseurs à fonds suractifs ;
- passes à ralentisseurs mixtes.

7.3.1 Cote de l'eau à l'amont de la passe Z_1

$$Z_1 = Z_{d1} + h_a$$

Avec Z_{d1} la cote de déversement du premier ralentisseur amont, h_a la charge amont.

7.3.2 Longueur de la passe

La longueur de la passe le long d'une ligne d'eau parallèle à la pente de la passe L_w est égale à

$$L_w = (Z_1 - Z_2) \frac{\sqrt{1 + S^2}}{S}$$

avec Z_1 et Z_2 les cotes de l'eau à l'amont et l'aval de la passe, S la pente.

La longueur de la passe le long de la pente L_S doit être un multiple de la longueur entre les ralentisseurs P arrondi à l'entier supérieur :

$$L_S = \lceil (L_w - \epsilon) / P \rceil \times P$$

Avec $\epsilon = 1$ mm pour laisser une marge avant le rajout d'un ralentisseur supplémentaire.

La projection horizontale de la longueur de la passe L_h est alors égale à :

$$L_h = \frac{L_S}{\sqrt{1 + S^2}}$$

7.3.3 Nombre de ralentisseurs N_b

Pour les types plans et Fatou :

$$N_b = L_S / P + 1$$

Pour les types à fonds suractifs et mixtes :

$$N_b = L_S / P$$

7.3.4 Cotes de radier à l'aval Z_{r2} et de déversement à l'aval Z_{d2}

$$Z_{r2} = Z_{r1} - \frac{L_S \times S}{\sqrt{1 + S^2}}$$

$$Z_{d2} = Z_{r2} + Z_{d1} - Z_{r1}$$

7.4 Passe à ralentisseurs plans (Denil)

Tous les concepts et formules sont extraits de la référence suivante :

Larinier, M. 2002. "BAFFLE FISHWAYS." Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture, no. 364 : 83–101. doi :[10.1051/kmae/2002109](https://doi.org/10.1051/kmae/2002109)

7.4.1 Caractéristiques géométriques

Extrait de Larinier, 2002

7.4.2 Lois hydrauliques issues des abaques

Les expériences effectuées par Larinier, 2002 ont permis d'établir des abaques permettant de relier le débit adimensionnel Q^* :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g}L^{2,5}}$$

à la charge amont ha et le niveau d'eau moyen dans la passe h :

Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 10% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 15% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 20% (Extrait de Larinier, 2002)

Pour effectuer les calculs pour toutes les pentes entre 8% et 22%, les coefficients de polynômes des abaques ci-dessus sont eux-mêmes ajustés sous la forme de polynômes dépendant de la pente S .

On a donc :

$$ha/L = a_2(S)Q^{*2} + a_1(S)Q^* + a_0(S)$$

$$a_2(S) = 315.110S^2 - 115.164S + 6.85371$$

$$a_1(S) = -184.043S^2 + 59.7073S - 0.530737$$

$$a_0(S) = 15.2115S^2 - 5.22606S + 0.633654$$

Et :

$$h/L = b_2(S)Q^{*2} + b_1(S)Q^* + b_0$$

$$b_2(S) = 347.368S^2 - 130.698S + 8.14521$$

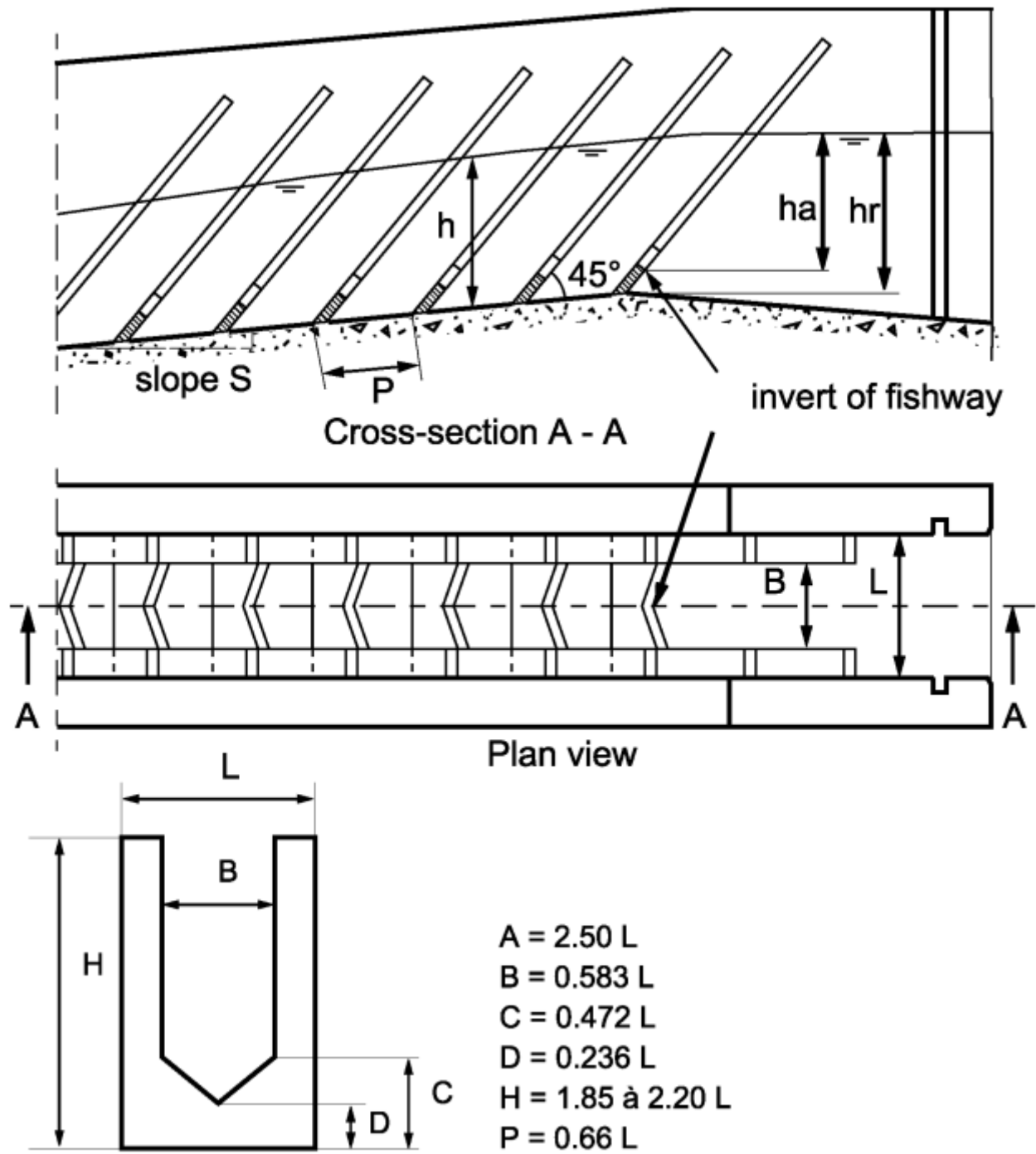


Figure 1: Characteristic parameters of a fishway with plane baffles.

FIGURE 7.1 – Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil)

$$b_1(S) = -139.382S^2 + 47.2186S + 0.0547598$$

$$b_0(S) = 16.7218S^2 - 6.09624S + 0.834851$$

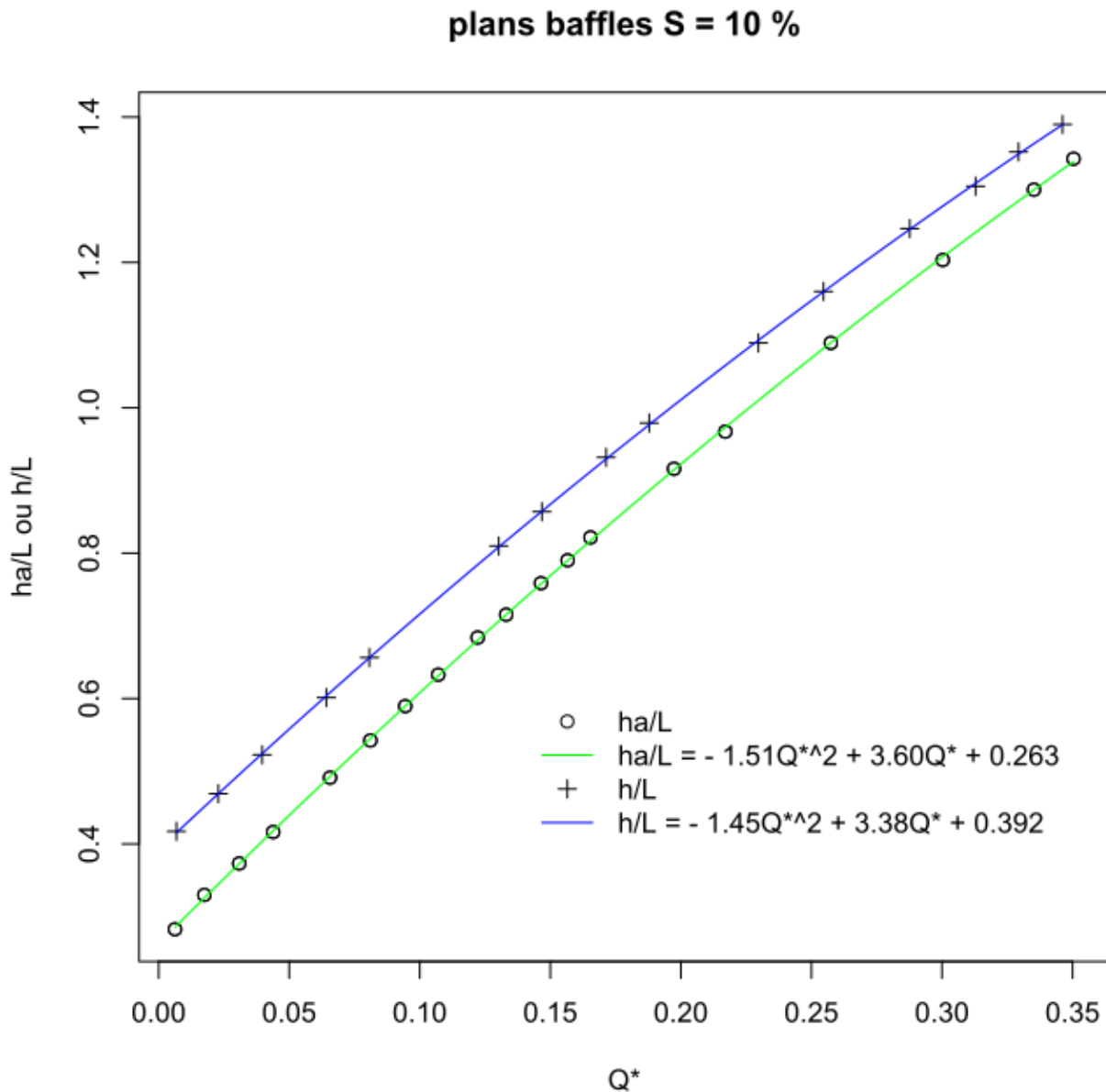


FIGURE 7.2 – Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 10%

7.4.3 Calcul de h_a , h et Q

On peut ensuite utiliser ces coefficients pour calculer h_a , h et Q^* :

$$h_a = L (a_2(Q^*)^2 + a_1Q^* + a_0)$$

$$h = L (b_2(Q^*)^2 + b_1Q^* + b_0)$$

En utilisant la fonction inverse positive en fonction de h_a/L , on obtient :

$$Q^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - h_a/L)}}{2a_2}$$

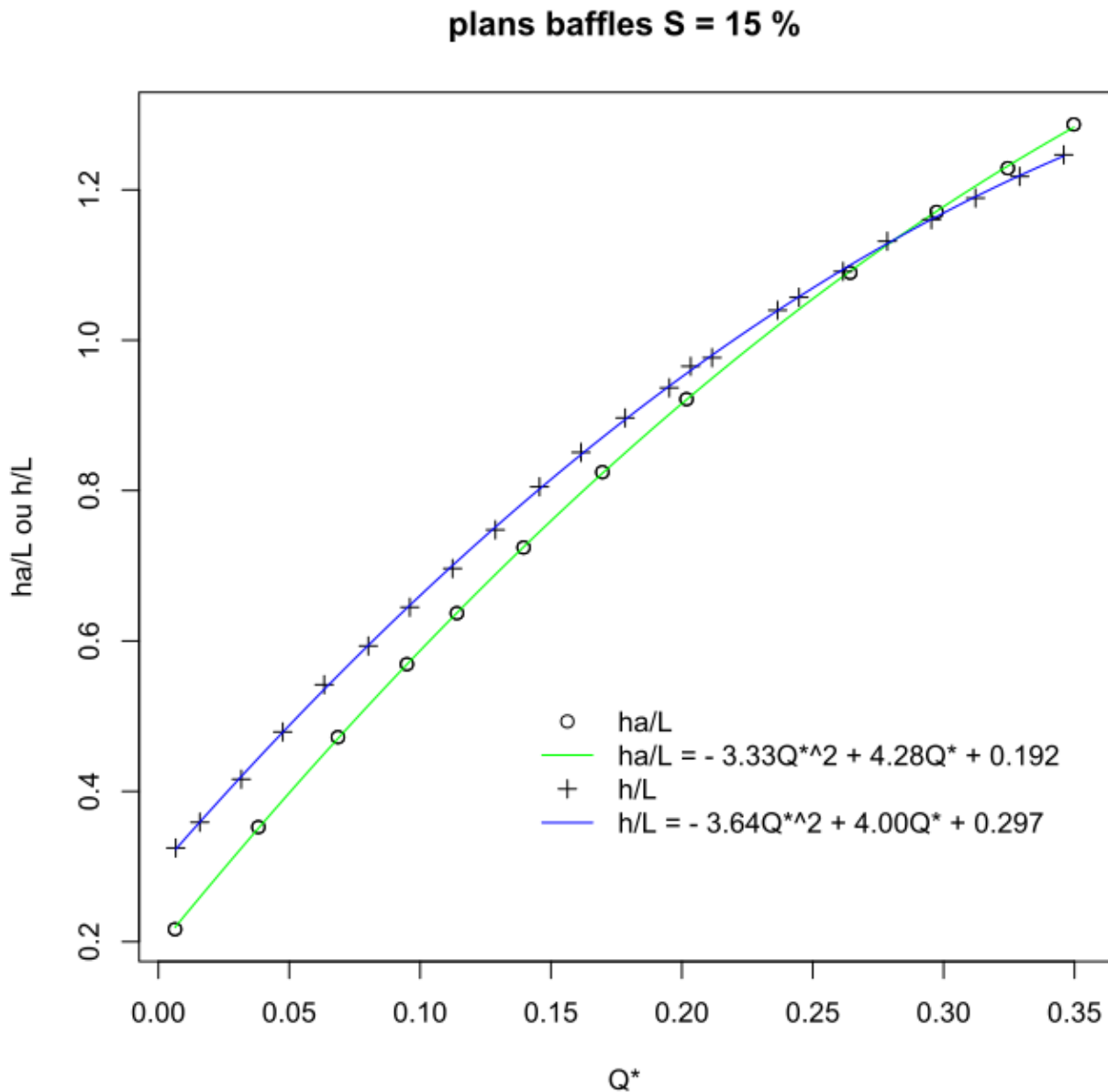


FIGURE 7.3 – Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 15%

Et on a enfin :

$$Q = Q^* \sqrt{g} L^{2,5}$$

Les limites de calcul de Q^* , ha/L et h/L sont fixées à partir des extrémités des courbes des abaques.

7.4.4 Vitesse débitante

La vitesse débitante V va correspondre à la vitesse moyenne d'écoulement compte tenu de la section d'écoulement A_w au droit du ralentisseur :

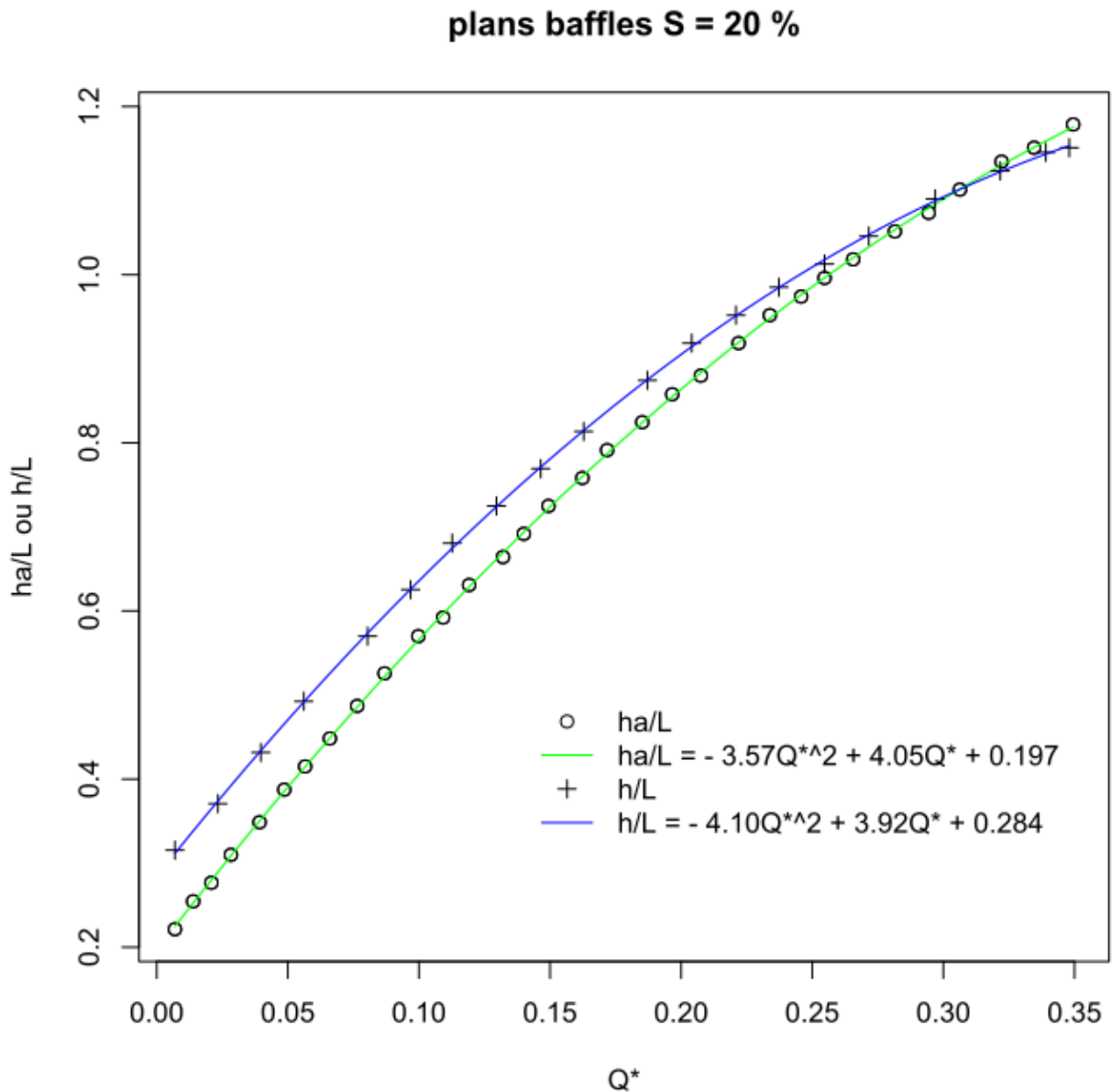


FIGURE 7.4 – Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 20%

$$V = \frac{Q}{A_w}$$

pour les passes à ralentisseurs plans en utilisant les notations du schéma ci-dessus, on aura :

$$A_w = B \times \left(h - \frac{C + D}{2} \sin(45^\circ) \right)$$

Ce qui donne avec les proportions standards :

$$A_w = L (0.583h - 0.146L)$$

7.4.5 Cote de radier amont Z_{r1}

$$Z_{r1} = Z_{d1} - D \sin(45^\circ + \arctan(S))$$

7.4.6 Cote d'arase minimale des murs latéraux Z_m

$$Z_m = Z_{r1} + -H_{min} \sin(45^\circ + \arctan(S))$$

7.5 Passe à ralentisseurs “Fatou”

Tous les concepts et formules sont extraits de la référence suivante :

Larinier, M. 2002. “BAFFLE FISHWAYS.” Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture, no. 364 : 83–101. doi :[10.1051/kmae/2002109](https://doi.org/10.1051/kmae/2002109)

7.5.1 Caractéristiques géométriques

Extrait de Larinier, 2002

7.5.2 Lois hydrauliques issues des abaques

Les expériences effectuées par Larinier, 2002 ont permis d'établir des abaques permettant de relier le débit adimensionnel Q^* :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g}L^{2,5}}$$

à la charge amont ha et le niveau d'eau moyen dans la passe h :

Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 10% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 15% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 20% (Extrait de Larinier, 2002)

Pour effectuer les calculs pour toutes les pentes entre 8% et 22%, les coefficients de polynômes des abaques ci-dessus sont eux-mêmes ajustés sous le forme de polynômes dépendant de la pente S .

On a donc :

$$ha/L = a_2(S)Q^{*2} + a_1(S)Q^* + a_0(S)$$

$$a_2(S) = -783.592S^2 + 269.991S - 25.2637$$

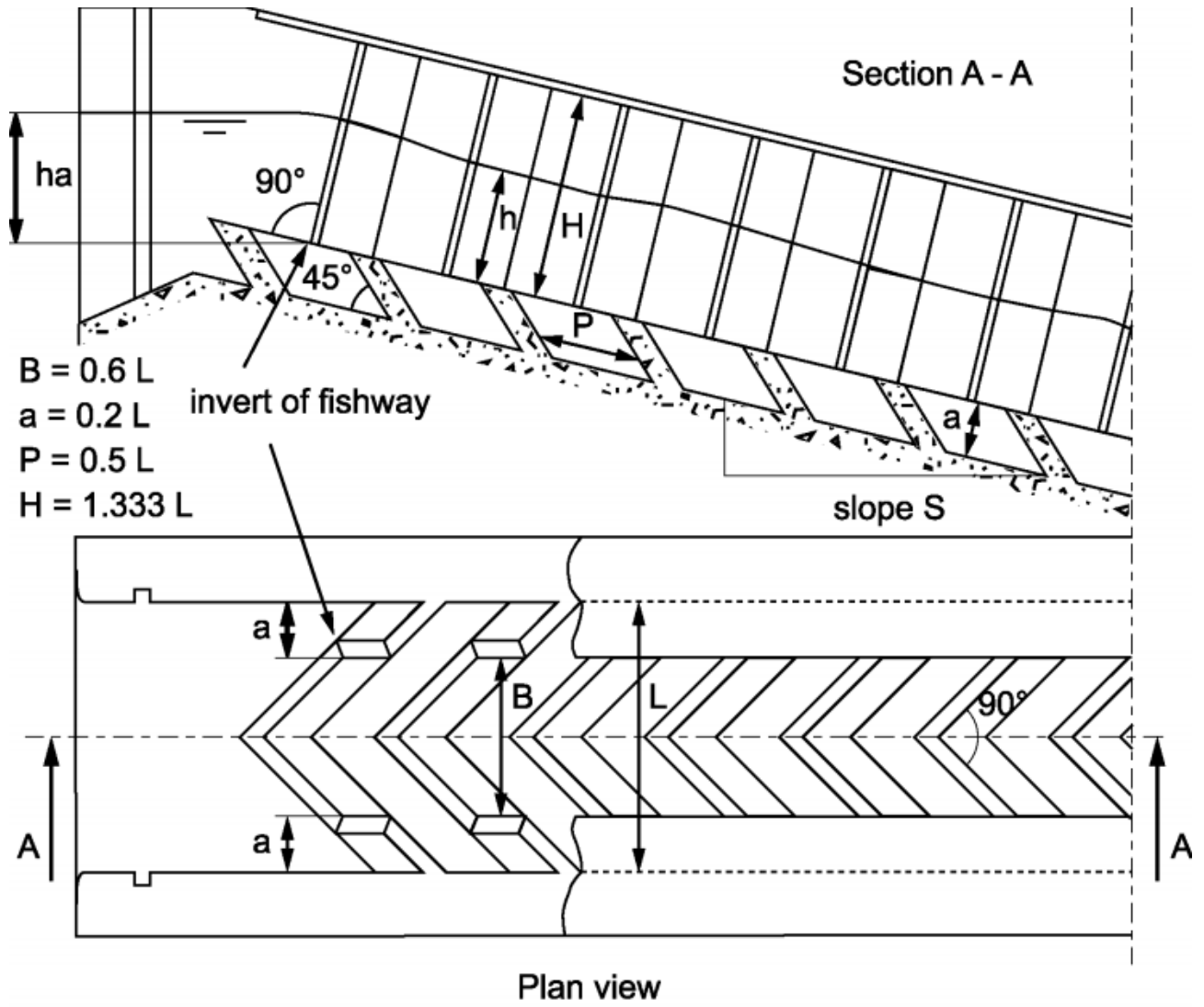


Figure 5: Characteristic parameters of the a fishway with Fatou baffles.

FIGURE 7.5 – Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs Fatou

$$a_1(S) = 302.623S^2 - 106.203S + 13.2957$$

$$a_0(S) = 15.8096S^2 - 5.19282S + 0.465827$$

Et :

$$h/L = b_2(S)Q^{*2} + b_1(S)Q^* + b_0$$

$$b_2(S) = -73.4829S^2 + 54.6733S - 14.0622$$

$$b_1(S) = 42.4113S^2 - 24.4941S + 8.84146$$

$$b_0(S) = -3.56494S^2 + 0.450262S + 0.0407576$$

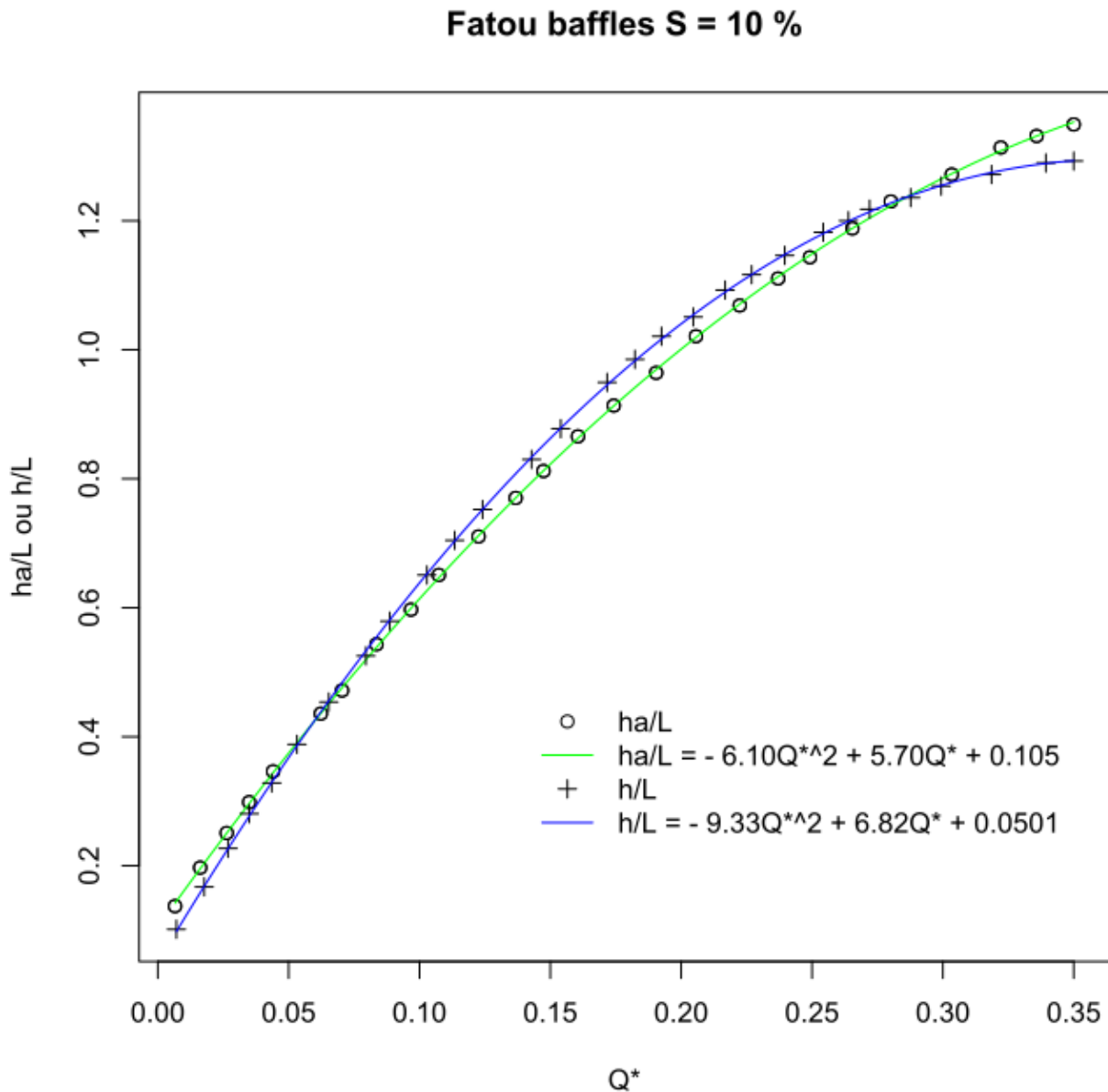


FIGURE 7.6 – Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 10%

7.5.3 Calcul de ha , h et Q

On peut ensuite utiliser ces coefficients pour calculer ha , h et Q^* :

$$ha = L (a_2(Q^*)^2 + a_1Q^* + a_0)$$

$$h = L (b_2(Q^*)^2 + b_1Q^* + b_0)$$

En utilisant la fonction inverse positive en fonction de ha/L , on obtient :

$$Q^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - ha/L)}}{2a_2}$$

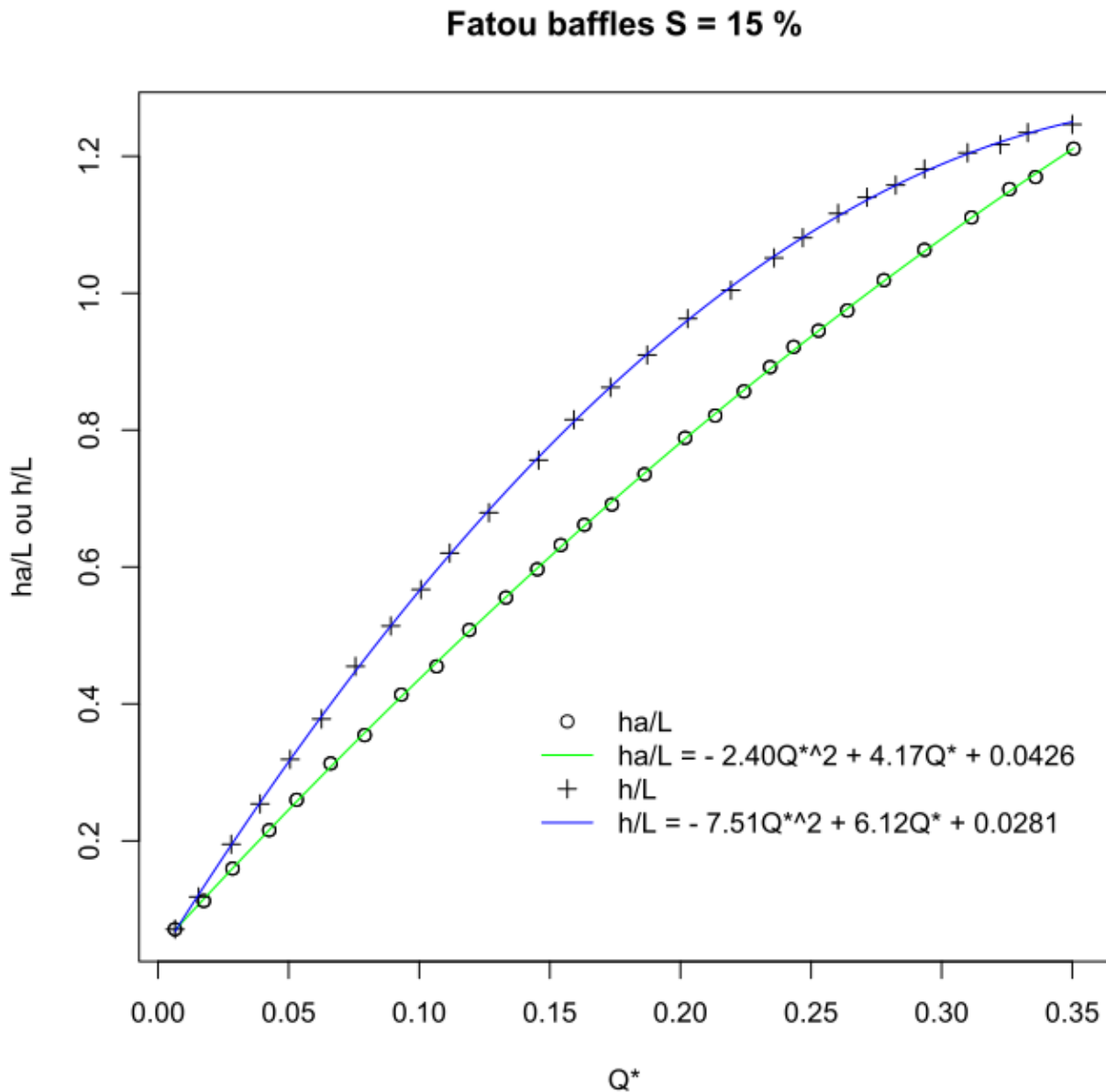


FIGURE 7.7 – Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 15%

Et on a enfin :

$$Q = Q^* \sqrt{g} L^{2,5}$$

Les limites de calcul de Q^* , ha/L et h/L sont fixées à partir des extrémités des courbes des abaques.

7.5.4 Vitesse débitante

La vitesse débitante V va correspondre à la vitesse moyenne d'écoulement compte tenu de la section d'écoulement A_w au droit du ralentisseur :

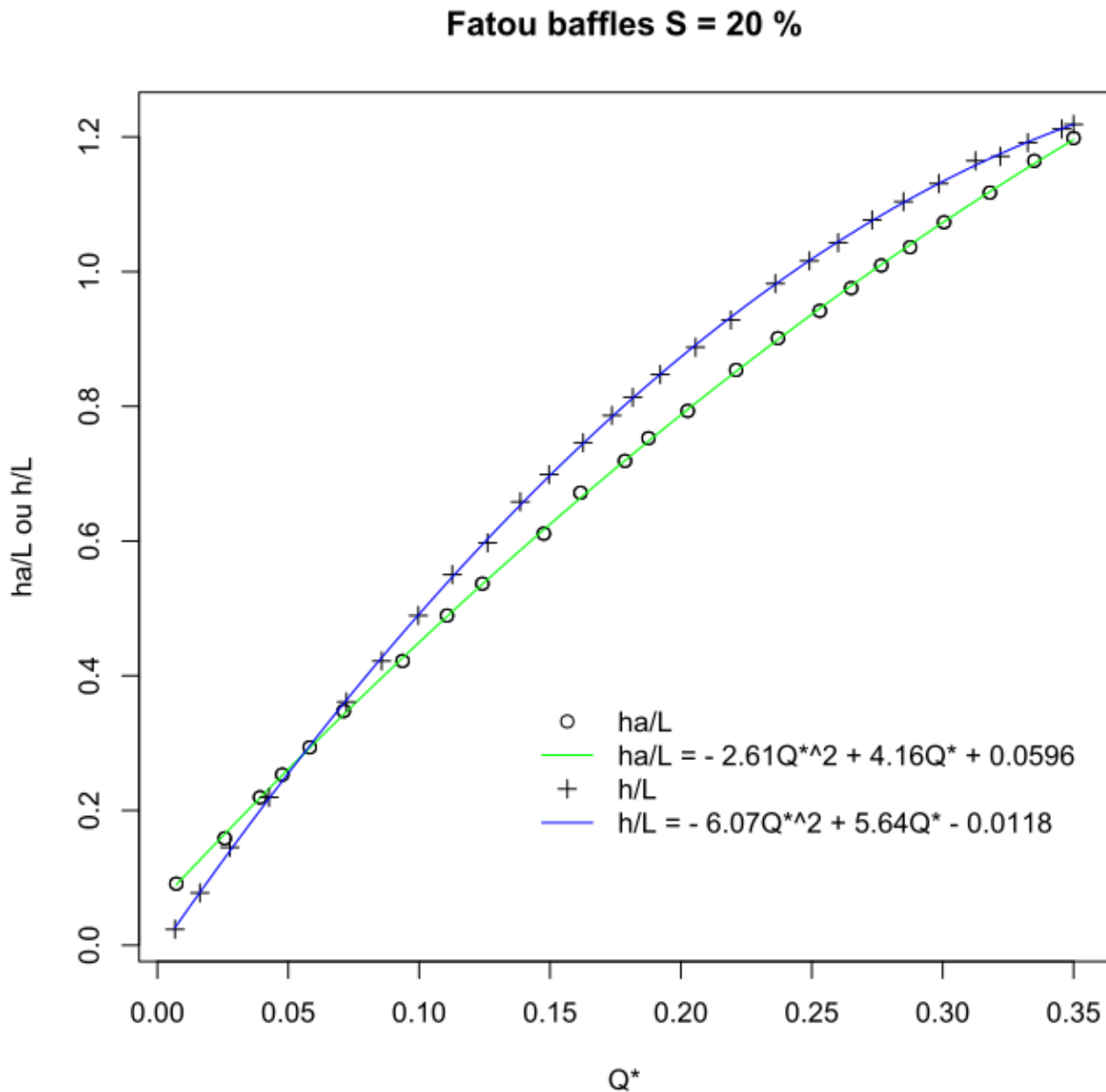


FIGURE 7.8 – Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 20%

$$V = \frac{Q}{A_w}$$

pour les passes à ralentisseurs Fatou en utilisation les notations du schéma ci-dessus, on aura :

$$A_w = B \times h$$

Ce qui donne avec les proportions standards :

$$A_w = 0.6hL$$

7.5.5 Cote de radier amont Z_{r1}

$$Z_{r1} = Z_{d1} + \frac{0.3S - 0.2}{\sqrt{1 + S^2}}$$

7.5.6 Cote d'arase minimale des murs latéraux Z_m

$$Z_m = Z_{r1} + \frac{4L}{3\sqrt{1 + S^2}}$$

7.6 Passe à ralentisseurs à fond suractif

Tous les concepts et formules sont extraits de la référence suivante :

Larinier, M. 2002. "BAFFLE FISHWAYS." Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture, no. 364 : 83–101. doi :[10.1051/kmae/2002109](https://doi.org/10.1051/kmae/2002109)

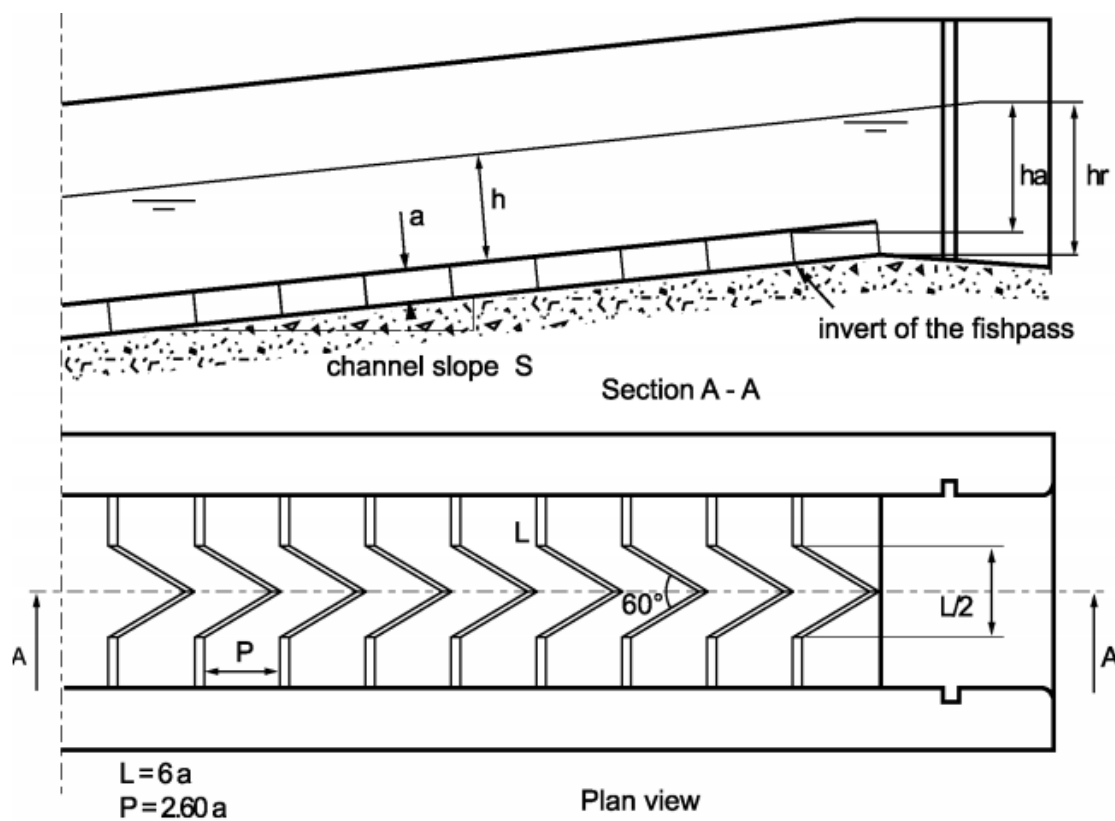


Figure 9: Characteristic parameters of a fishway with super-active-type bottom baffles.

FIGURE 7.9 – Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs à fonds suractif

Extrait de Larinier, 2002

7.6.1 Loix hydrauliques issues des abaques

Les expériences effectuées par Larinier, 2002 ont permis d'établir des abaques permettant de relier le débit adimensionnel q^* :

$$q^* = \frac{Q/L}{\sqrt{2ga^{1,5}}}$$

à la charge amont h_a et le niveau d'eau moyen dans la passe h :

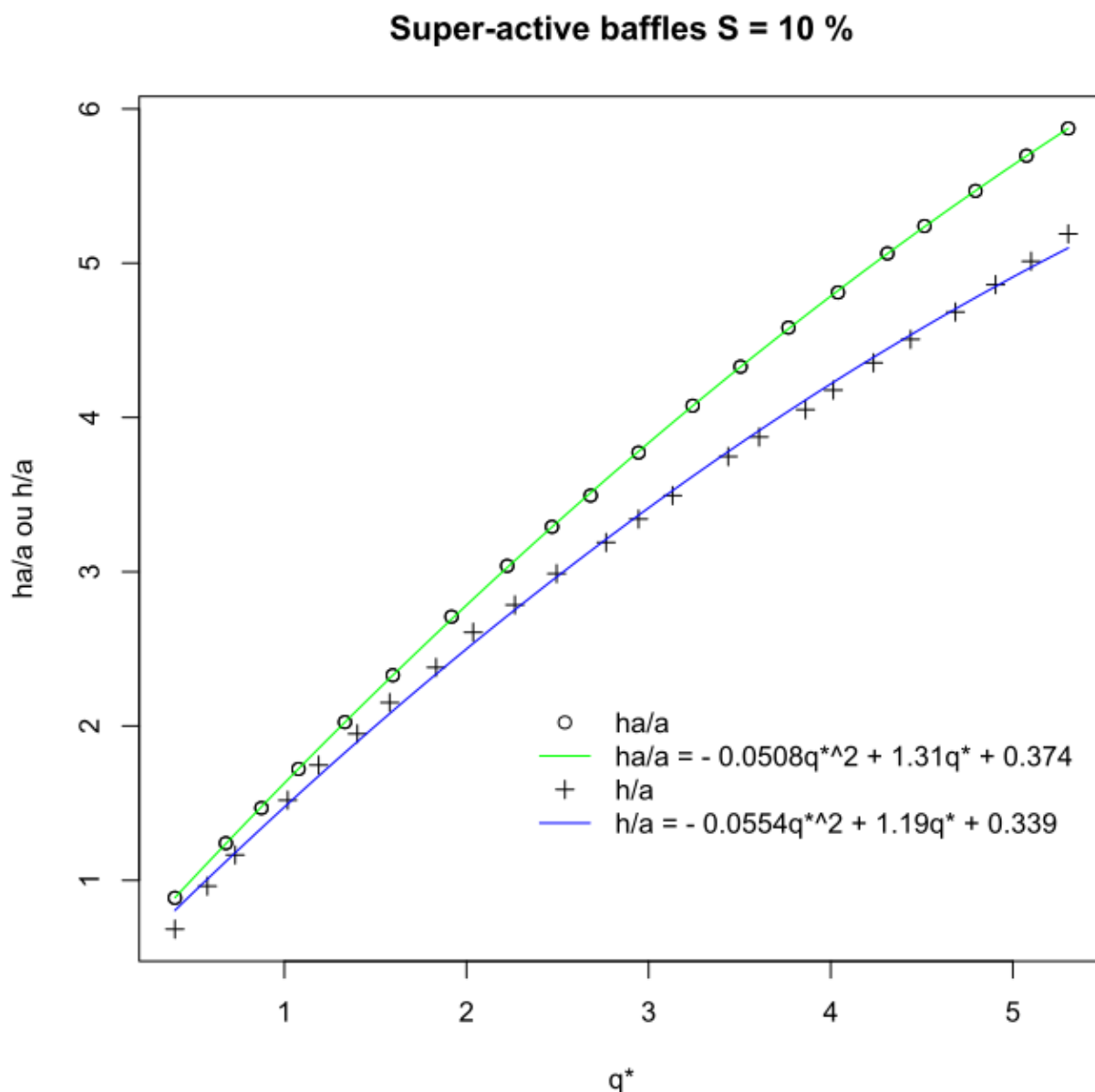


FIGURE 7.10 – Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 10%

Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 10% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 15% (Extrait de Larinier, 2002)

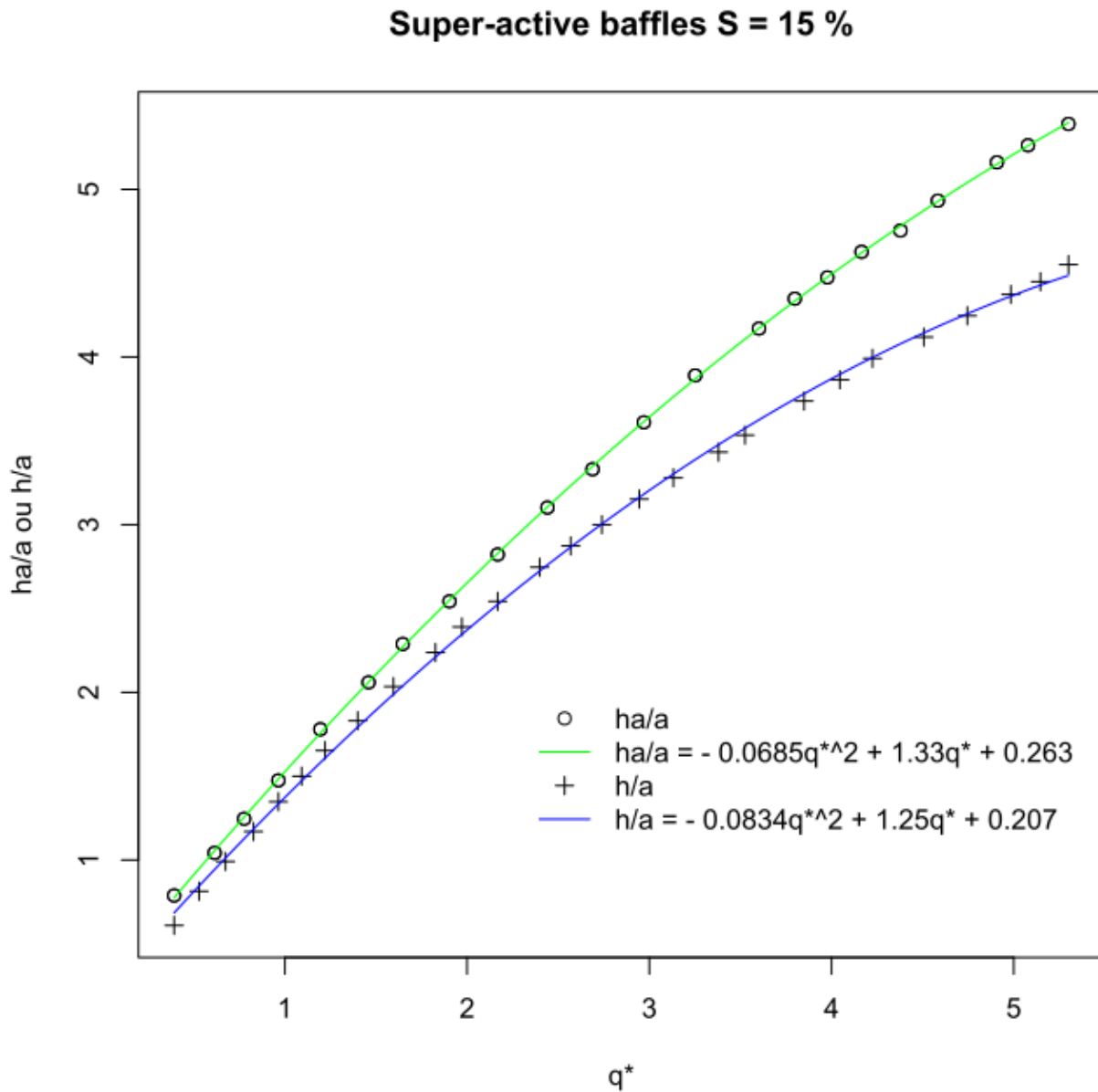


FIGURE 7.11 – Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 15%

Pour effectuer les calculs pour toutes les pentes entre 8% et 22%, les coefficients de polynômes des abaques ci-dessus sont eux-mêmes ajustés sous la forme de polynômes dépendant de la pente S .

On a donc :

$$ha/a = a_2(S)q^{*2} + a_1(S)q^* + a_0(S)$$

$$a_2(S) = -0.354624S - 0.0153156$$

$$a_1(S) = 0.514953S + 1.25460$$

$$a_0(S) = -2.22434S + 0.596682$$

Et :

$$h/a = b_2(S)q^{*2} + b_1(S)q^* + b_0$$

$$b_2(S) = -0.559218S + 0.000504060$$

$$b_1(S) = 1.15807S + 1.07554$$

$$b_0(S) = -2.62712S + 0.601348$$

7.6.2 Calcul de ha , h et Q

On peut ensuite utiliser ces coefficients pour calculer ha , h et q^* :

$$ha = a (a_2(q^*)^2 + a_1q^* + a_0)$$

$$h = a (b_2(q^*)^2 + b_1q^* + b_0)$$

En utilisant la fonction inverse positive en fonction de ha/L , on obtient :

$$q^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - ha/a)}}{2a_2}$$

Et on a enfin :

$$Q = Lq^* \sqrt{g} a^{1,5}$$

Les limites de calcul de q^* , ha/a et h/a sont fixées à partir des extrémités des courbes des abaques.

7.6.3 Vitesse débitante

La vitesse débitante V va correspondre à la vitesse moyenne d'écoulement compte tenu de la section d'écoulement A_w au droit du ralentisseur :

$$V = \frac{Q}{A_w}$$

pour les passes à ralentisseurs à fond suractif en utilisant les notations du schéma ci-dessus, on aura :

$$A_w = h \times L$$

7.6.4 Cote de radier amont Z_{r1}

$$Z_{r1} = Z_{d1} + \frac{2.6aS - a}{\sqrt{1 + S^2}}$$

7.7 Passe à ralentisseurs mixte ou à chevrons

Tous les concepts et formules sont extraits de la référence suivante :

Larinier, M. 2002. "BAFFLE FISHWAYS." Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture, no. 364 : 83–101. doi :[10.1051/kmae/2002109](https://doi.org/10.1051/kmae/2002109)

Extrait de Larinier, 2002

7.7.1 Lois hydrauliques issues des abaques

Les expériences effectuées par Larinier, 2002 ont permis d'établir des abaques permettant de relier le débit adimensionnel q^* :

$$q^* = \frac{Q/L}{\sqrt{2g}a^{1,5}}$$

à la charge amont ha et le niveau d'eau moyen dans la passe h :

Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 10% (Extrait de Larinier, 2002)

Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 15% (Extrait de Larinier, 2002)

Pour effectuer les calculs pour toutes les pentes entre 8% et 22%, les coefficients de polynômes des abaques ci-dessus sont eux-mêmes ajustés sous la forme de polynômes dépendant de la pente S .

On a donc :

$$ha/a = a_2(S)q^{*2} + a_1(S)q^* + a_0(S)$$

$$a_2(S) = 0.188324S - 0.0427461$$

$$a_1(S) = -2.47998S + 1.25363$$

$$a_0(S) = 5.02138S + 0.709434$$

Et :

$$h/a = b_2(S)q^{*2} + b_1(S)q^* + b_0$$

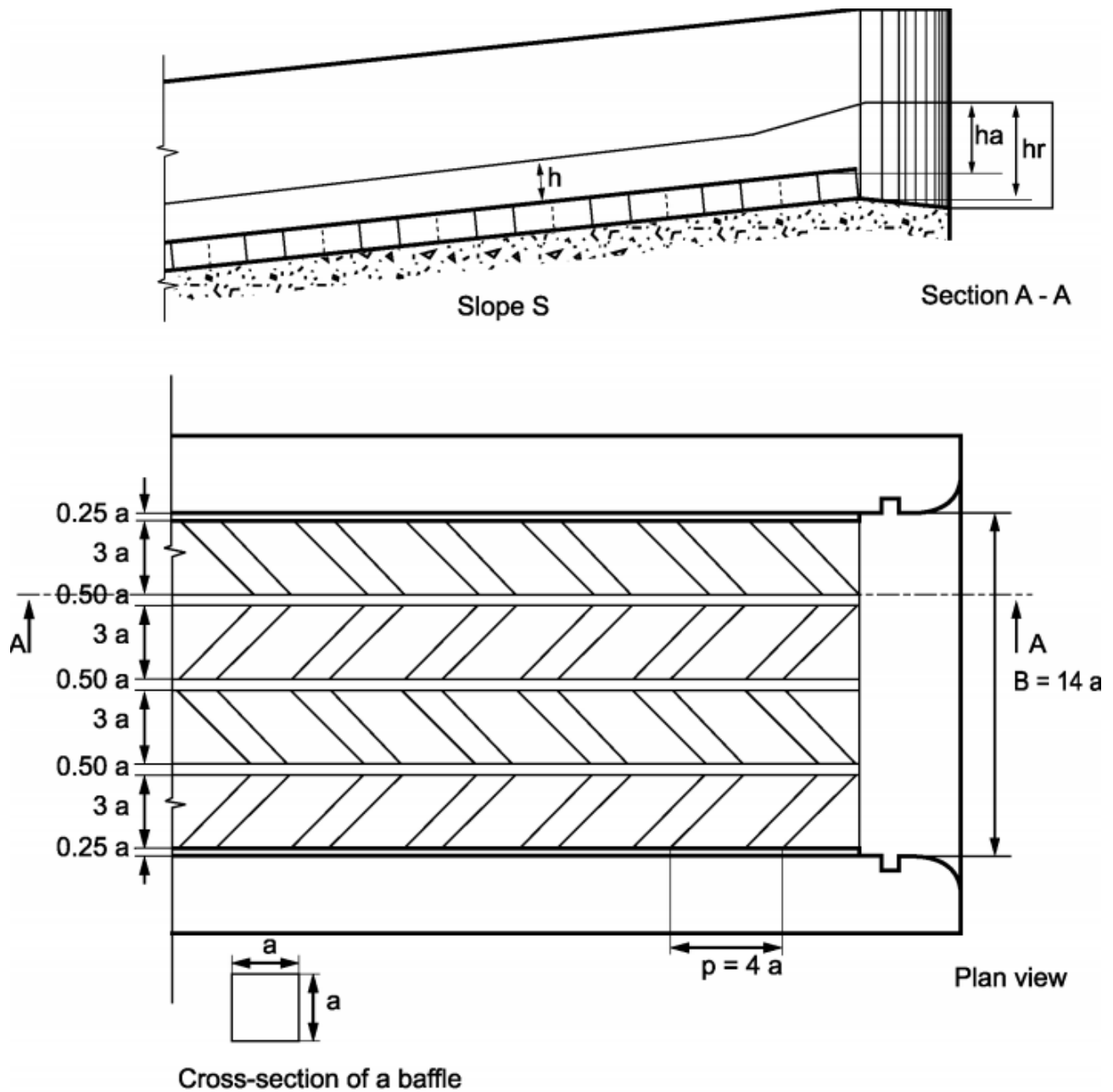


Figure 13: Characteristic parameters of a chevron baffle fishway.

FIGURE 7.12 – Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs mixte ou à chevrons

$$b_2(S) = -0.0733832S - 0.00839864$$

$$b_1(S) = 0.176261S + 0.661656$$

$$b_0(S) = -4.97686S + 1.30546$$

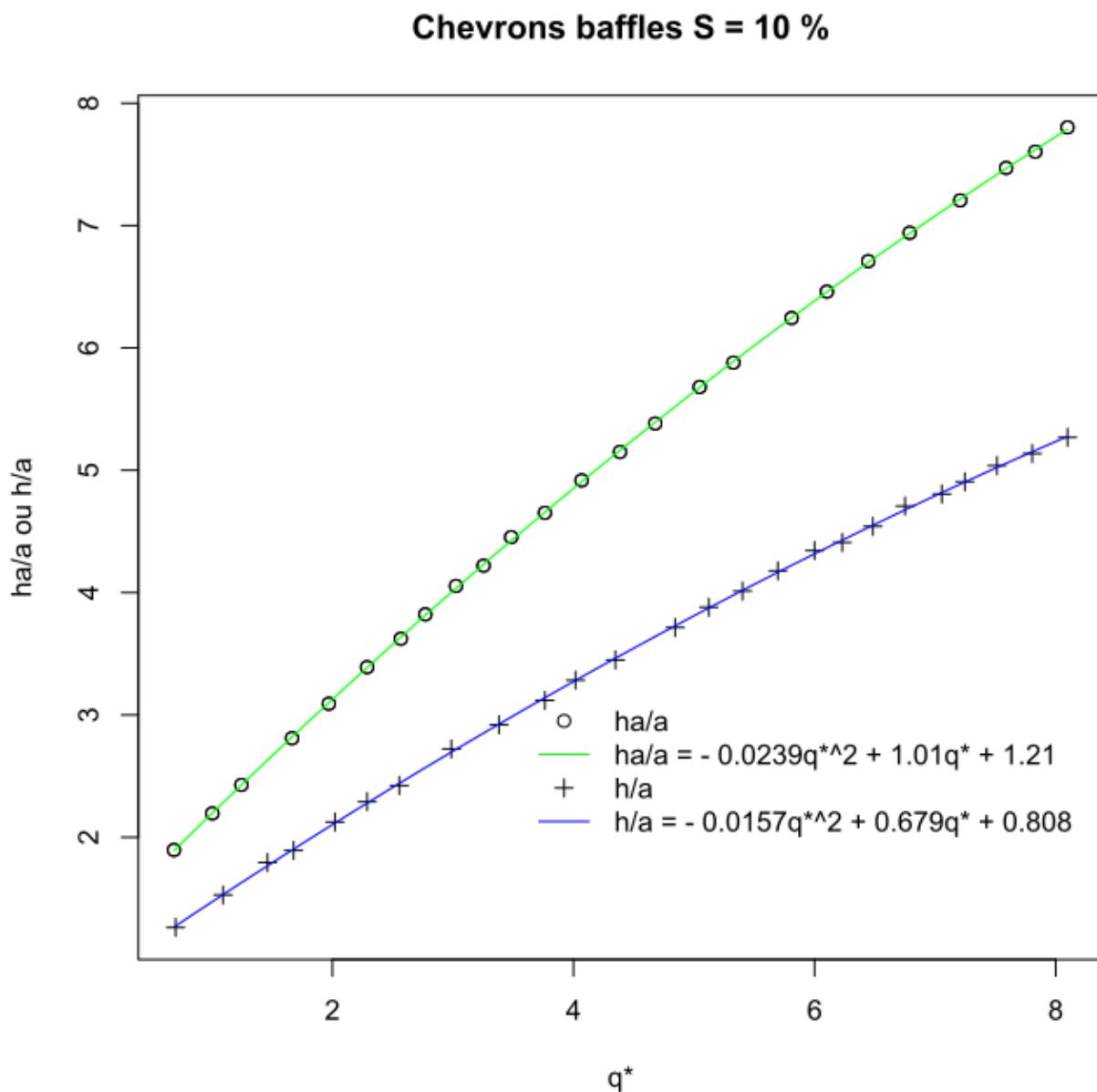


FIGURE 7.13 – Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 10%

7.7.2 Calcul de ha , h et Q

On peut ensuite utiliser ces coefficients pour calculer ha , h et q^* :

$$ha = a (a_2(q^*)^2 + a_1q^* + a_0)$$

$$h = a (b_2(q^*)^2 + b_1q^* + b_0)$$

En utilisant la fonction inverse positive en fonction de ha/L , on obtient :

$$q^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - ha/a)}}{2a_2}$$

Chevrons baffles S = 16 %

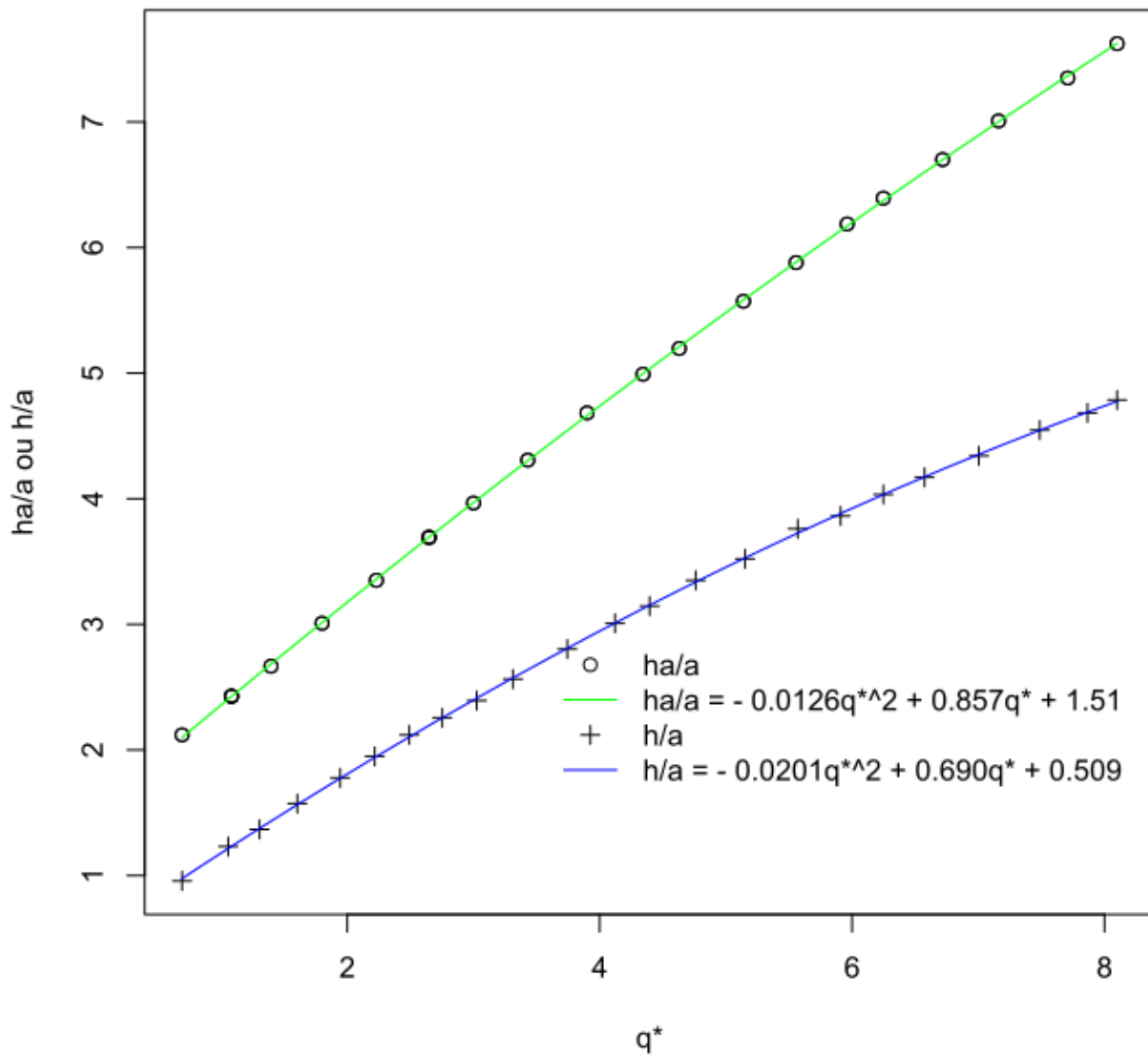


FIGURE 7.14 – Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 16%

Et on a enfin :

$$Q = Lq^* \sqrt{g} a^{1,5}$$

Les limites de calcul de q^* , ha/a et h/a sont fixées à partir des extrémités des courbes des abaques.

7.7.3 Vitesse débitante

La vitesse débitante V va correspondre à la vitesse moyenne d'écoulement compte tenu de la section d'écoulement A_w au droit du ralentisseur :

$$V = \frac{Q}{A_w}$$

pour les passes à ralentisseurs mixte en utilisation les notations du schéma ci-dessus, on aura :

$$A_w = h \times L$$

7.7.4 Cote de radier amont Z_{r1}

$$Z_{r1} = Z_{d1} + \frac{3aS - a}{\sqrt{1 + S^2}}$$

8 Vérification des critères de franchissement

8.1 Vérification des critères de franchissement

8.1.1 Avertissement

Cet outil a pour objectif de réaliser une vérification simple de la compatibilité entre certains critères de dimensionnement des passes à poissons et les capacités de franchissement des espèces de poissons cibles. Il peut s'avérer utile lors de la phase de conception d'un dispositif afin de s'assurer de la cohérence du dimensionnement projeté sur sa plage de fonctionnement hydrologique.

Cet outil n'est cependant pas suffisant pour la vérification complète de la fonctionnalité d'un dispositif projeté ou déjà réalisé, dans la mesure où d'autres critères importants, dimensionnels et hydrauliques, ne sont pas pris en compte par ce module (débit d'alimentation et caractéristique de l'entrée piscicole vis-à-vis de l'attractivité, et selon les types de dispositif : rapport de forme des bassins, concentration des macrorugosités, rugosités de fond, taille des ralentisseurs. . .).

Cet outil permet de vérifier la capacité des différentes espèces de poissons à franchir les types de passes suivants :

- passes à bassins
- passes à ralentisseurs
- passes à macrorugosités

8.1.2 Principe

Pour chaque type de passe, on contrôle plusieurs critères de franchissabilité, exprimés sous forme de valeurs limites (ex : profondeur minimale de bassin, pour une passe à bassins).

Tout dépassement de la valeur limite d'un critère donne lieu à une erreur explicite mentionnant la grandeur concernée et la valeur limite, et entraîne la non franchissabilité de la passe.

Certains critères comme la puissance maximale dissipée possèdent à la fois une valeur d'alerte (la franchissabilité n'est pas garantie mais reste possible) et une valeur limite (le franchissement est impossible).

Pour une même passe, on peut vérifier simultanément la capacité de franchissement de plusieurs espèces, sur plusieurs modalités (variation d'un ou plusieurs paramètres de la passe).

8.1.3 Espèces prédéfinies

Plusieurs groupes d'espèces communes sont prédéfinis : des valeurs par défaut sont associées aux critères de franchissement.

Les valeurs par défaut de certains critères peuvent être absentes pour un groupe d'espèces, lorsque celui-ci est considéré comme incapable de franchir le type de passes auquel le critère est rattaché.

8.1.4 Espèces personnalisées

Le module `Espèce` permet de définir des valeurs personnalisées pour tous les critères, avant de lancer la vérification d'une passe.

Si un critère est applicable à la passe à vérifier mais aucune valeur n'a été saisie, une erreur sera affichée lors de la vérification, entraînant la non franchissabilité de la passe.

8.2 Vérification des critères de franchissement : Passes à bassins

Lors de la vérification d'une passe à bassins, les bassins et les cloisons sont testés séquentiellement, ainsi que tous les ouvrages de chaque cloison. Si au moins un bassin est infranchissable, alors la passe est infranchissable.

Les critères diffèrent selon que l'ouvrage considéré donne lieu à un jet plongeant ou à un jet de surface. Si une cloison possède plusieurs ouvrages, elle sera considérée comme franchissable si au moins un ouvrage est franchissable.

Les orifices sont considérés comme infranchissables.

Pour certaines espèces, les valeurs de certains critères ne sont pas précisément connues ou sont susceptibles d'évoluer quelque peu en fonction des retours d'expérience futurs.

8.2.1 Critères

8.2.1.1 Jet plongeant

Certaines espèces ne supportent pas les jets plongeants. Pour ces espèces, chaque ouvrage donnant lieu à un jet plongeant est marqué comme infranchissable.

8.2.1.2 Chute maximale, en m

La chute du bassin doit être inférieure à la chute maximale.

8.2.1.3 Largeur minimale de fente ou échancrure latérale, en m (jet de surface seulement)

La largeur de la fente ou échancrure doit être supérieure à la largeur minimale.

8.2.1.4 Surface minimale de l'orifice, en m^2

La surface de l'orifice doit être supérieure à la largeur minimale de fente ou échancrure latérale (ci-dessus) au carré.

8.2.1.5 Charge minimale sur l'échancrure, en m

La charge sur l'échancrure doit être supérieure à la charge minimale.

8.2.1.6 Profondeur minimale de bassin, en m

La profondeur du bassin doit être supérieure à la profondeur minimale. Dans le cas d'un jet plongeant, la profondeur doit être supérieure au double de la chute du bassin.

8.2.1.7 Longueur minimale de bassin, en m

La longueur du bassin doit être supérieure à la longueur minimale.

8.2.1.8 Puissance dissipée maximale préconisée et maximale limite, en W/m^3

La puissance dissipée maximale dans le bassin doit être inférieure à la puissance dissipée maximale limite. Si elle est supérieure à la puissance dissipée maximale préconisée, un avertissement est émis.

Important : la vérification de la puissance dissipée maximale est **désactivée** dans la version actuelle de Cassiopée

8.2.2 Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis

D'après "Informations sur la Continuité Écologique - ICE, Onema 2014", et et OFB com. pers.

8.2.2.1 Valeurs communes pour jet de surface et jet plongeant

TABLE 8.1 – Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins

Groupe ICE	Espèces	Charge minimale sur l'échancrure (m)	Puissance dissipée maximale préconisée (W/m ³)	Puissance dissipée maximale limite (W/m ³)
1	Saumon atlantique (Salmo salar) Truite de mer ou de rivière [50-100] (Salmo trutta)	0.3	200	250
2	Mulets (Chelon labrosus, Liza ramada)	0.2	200	250
3a	Grande alose (Alosa alosa)	0.4	150	200
3b	Alose feinte (Alosa fallax fallax)	0.4	150	200
3c	Lamproie marine (Petromyzon marinus)	0.15	200	250
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (Salmo trutta)	0.2	200	250
4b	Truite de rivière [15-30] (Salmo trutta)	0.2	200	250
5	Aspe (Aspius aspius) Brochet (Esox lucius)	0.2	150	200
6	Ombre commun (Thymallus thymallus)	0.2	200	250
7a	Barbeau fluviatile (Barbus barbus) Chevaine (Squalius cephalus) Hotu (Chondrostoma nasus)	0.2	150	200

Groupe ICE	Espèces	Charge minimale sur l'échancrure (m)	Puissance dissipée maximale préconisée (W/m³)	Puissance dissipée maximale limite (W/m³)
7b	Lamproie fluviale (Lampetra fluviatilis)	0.15	130	150
8a	Carpe commune (Cyprinus carpio)	0.2	-	-
8b	Brème commune (Abramis brama) Sandre (Sander luciperca)	0.2	150	200
8c	Brème bordelière (Blicca bjoerkna) Ide melanote (Leuciscus idus) Lotte de rivière (Lota lota) Perche (Perca fluviati- lis) Tanche (Tinca tinca)	0.2	130	150
8d	Vandoises (Leuciscus sp hors Idus)	0.2	150	200

Groupe ICE	Espèces	Charge minimale sur l'échancrure (m)	Puissance dissipée maximale préconisée (W/m³)	Puissance dissipée maximale limite (W/m³)
9a	Ablette commune (Alburnus al- burnus)Ablette spirilin (Alburnoides bipuncta- tus)Barbeau méridional (Barbus meridiona- lis)Blageon (Telestes souf- fia)Carassin commun (Carassius caras- sius)Carassin argenté (Carassius gibelio)Gardon (Rutilus ruti- lus)Rotengle (Scardinius erythrophthal- mus)Toxostome (Parachondro- stoma toxostoma)	0.2	130	150

Groupe ICE	Espèces	Charge minimale sur l'échancrure (m)	Puissance dissipée maximale préconisée (W/m³)	Puissance dissipée maximale limite (W/m³)
9b	Apron (Zingel asper)Chabots (Cottus sp)Goujons (Gobio sp)Grémille (Gymnocephalus cer-nuus)Lamproie de Planer (Lampetra planeri)Loche franche (Barbatula barbatula)Loche de rivière (Cobitis taenia)	0.2	130	150
10	Able de Heckel (Leucaspius delineatus)Bouvière (Rhodeus amarus)Epinoche (Gasterosteus gym-nurus)Epinochette (Pungitius laevis)Vairons (Phoxinus sp)	0.2	100	150

8.2.2.2 Jet de surface

TABLE 8.2 – Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins, en jet de surface

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
1	Saumon atlantique (Salmo salar) Truite de mer ou de rivière [50-100] (Salmo trutta)	0.35	0.3	1	2.5
2	Mulets (Chelon labrosus, Liza ramada)	0.35	0.2	1	1.75
3a	Grande alose (Alosa alosa)	0.3	0.4	1	3.5
3b	Alose feinte (Alosa fallax fallax)	0.3	0.4	1	3.5
3c	Lamproie marine (Petromyzon marinus)	0.3	0.15	1	1.25
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (Salmo trutta)	0.35	0.2	1	1.75
4b	Truite de rivière [15-30] (Salmo trutta)	0.3	0.15	0.75	1.75

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
5	Aspe (Aspius aspius)Brochet (Esox lucius)	0.3	0.3	0.75	2.5
6	Ombre commun (Thymallus thymallus)	0.3	0.2	0.75	1.75
7a	Barbeau fluviatile (Barbus barbus)Chevaine (Squalius cephalus)Hotu (Chondrostoma nasus)	0.3	0.25	0.75	2
7b	Lamproie fluviatile (Lampetra fluviatilis)	0.3	0.15	0.75	1.25
8a	Carpe commune (Cyprinus carpio)	0.25	0.3	0.75	2.5
8b	Brème commune (Abramis brama)Sandre (Sander lucioperca)	0.25	0.3	0.75	2.5

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
8c	Brème bordelière (Blicca bjoerkna)Ide melanote (Leuciscus idus)Lotte de rivière (Lota lota)Perche (Perca fluviatilis)Tanche (Tinca tinca)	0.25	0.3	0.75	2.5
8d	Vandoises (Leuciscus sp hors Idus)	0.25	0.3	0.75	2.5

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
9a	Ablette commune (Alburnus alburnus) Ablette sprirlin (Alburnoides bipunctatus) Barbeau méridional (Barbus meridionalis) Blageon (Telestes souffia) Carassin commun (Carassius carassius) Carassin argenté (Carassius gibelio) Gardon (Rutilus rutilus) Rotengle (Scardinius erythrophthalmus) Toxostome (Parachondrostoma toxostoma)	0.25	0.25	0.75	2

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
9b	Apron (Zingel asper)Chabots (Cottus sp)Goujons (Gobio sp)Grémille (Gymnocephalus cer-nuus)Lamproie de Planer (Lampetra pla-neri)Loche franche (Barbatula barba-tula)Loche de rivière (Cobitis taenia)	0.2	0.15	0.5	1.25
10	Able de Heckel (Leucaspius delineatus)Bouvière (Rhodeus ama-rus)Epinoche (Gasterosteus gymnu-rus)Epinochette (Pungitius lae-vis)Vairons (Phoxinus sp)	0.2	0.15	0.5	1.25

8.2.2.3 Jet plongeant

TABLE 8.3 – Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins, en jet plongeant

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m)	Profondeur minimale de bassin (m)	Longueur minimale de bassin (m)
1	Saumon atlantique (Salmo salar) Truite de mer ou de rivière [50-100] (Salmo trutta)	0.75	1	2
2	Mulets (Chelon labrosus, Liza ramada)	0.6	0.75	1.25
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (Salmo trutta)	0.4	0.75	1.25
4b	Truite de rivière [15-30] (Salmo trutta)	0.3	0.75	1
6	Ombre commun (Thymallus thymallus)	0.3	0.75	1

8.3 Vérification des critères de franchissement : Passes à ralentisseurs (simulation)

Pour certaines espèces, les valeurs de certains critères ne sont pas précisément connues ou sont susceptibles d'évoluer quelque peu en fonction des retours d'expérience futurs.

8.3.1 Critères

8.3.1.1 Espèces déconseillées et incompatibles

Les groupes d'espèces 3a, 3b et 7b sont déconseillés pour le franchissement d'une passe à ralentisseurs. Cela donne lieu à un avertissement, sans pour autant entraîner l'infranchissabilité de la passe.

Les groupes d'espèces 8a, 8b, 8c, 8d, 9a, 9b et 10 sont incapables de franchir des passes à ralentisseurs.

8.3.1.2 Tirant d'eau minimal, en m

Le tirant d'eau dans la passe doit être supérieur au tirant d'eau minimal.

8.3.2 Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis

D'après "Informations sur la Continuité Écologique - ICE, Onema 2014".

TABLE 8.4 – Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à ralentisseurs

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal sur les ralentisseurs plans / Fatou (m)	Tirant d'eau minimal sur les ralentisseurs suractifs / mixtes (chevrons) (m)
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0.3	0.2
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0.25	0.15
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0.3	0.2
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0.25	0.15
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0.1	0.1
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0.25	0.15
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0.2	0.1

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal sur les ralentisseurs plans / Fatou (m)	Tirant d'eau minimal sur les ralentisseurs suractifs / mixtes (chevrons) (m)
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0.3	0.2
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0.25	0.15
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0.25	0.15
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0.1	0.1

8.4 Vérification des critères de franchissement : Passes à macrorugosités

8.4.1 Passes à macrorugosités complexes

Dans le cas des passes à macrorugosités complexes, chaque radier (rappel : les radiers inclinés sont discrétisés) est vérifié comme une passe à macrorugosités indépendante.

Si au moins un radier est franchissable, la passe est considérée comme franchissable.

La largeur maximale franchissable, maximum des sommes des largeurs des radiers franchissables contigus, est indiquée à l'issue de la vérification.

Pour certaines espèces, les valeurs de certains critères ne sont pas précisément connues ou sont susceptibles d'évoluer quelque peu en fonction des retours d'expérience futurs.

8.4.2 Critères

8.4.2.1 Tirant d'eau minimal, en m

Le tirant d'eau dans la passe doit être supérieur au tirant d'eau minimal.

8.4.2.2 Vitesse d'écoulement maximale limite, en m/s

La vitesse d'écoulement maximale dans la passe doit être inférieure à la vitesse d'écoulement maximale limite.

8.4.3 Valeurs des critères pour les groupes d'espèces prédéfinis

D'après "Informations sur la Continuité Écologique - ICE, Onema 2014".

TABLE 8.5 – Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à macrorugosités

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal (m)	Vitesse d'écoulement maximale limite (m/s)
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0.4	2.5
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0.3	2.5
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0.4	2
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0.4	2
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0.15	2
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0.3	2
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0.2	2
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0.3	2
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0.3	2
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0.3	2

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal (m)	Vitesse d'écoulement maximale limite (m/s)
7b	Lamproie fluviatile (Lampetra fluviatilis)	0.15	2
8a	Carpe commune (Cyprinus carpio)	0.3	1.5
8b	Brème commune (Abramis brama)Sandre (Sander lucioperca)	0.3	1.5
8c	Brème bordelière (Blicca bjoerkna)Ide melanote (Leuciscus idus)Lotte de rivière (Lota lota)Perche (Perca fluviatilis)Tanche (Tinca tinca)	0.3	1.5
8d	Vandoises (Leuciscus sp hors Idus)	0.3	1.5

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal (m)	Vitesse d'écoulement maximale limite (m/s)
9a	Ablette commune (Alburnus alburnus) Ablette spirilin (Alburnoides bipunctatus) Barbeau méridional (Barbus meridionalis) Blageon (Telestes souffia) Carassin commun (Carassius carassius) Carassin argenté (Carassius gibelio) Gardon (Rutilus rutilus) Rotengle (Scardinius erythrophthalmus) Toxostome (Parachondrostoma toxostoma)	0.2	1.5
9b	Apron (Zingel asper) Chabots (Cottus sp) Goujons (Gobio sp) Grémille (Gymnocephalus cernuus) Lamproie de Planer (Lampetra planeri) Loche franche (Barbatula barbatula) Loche de rivière (Cobitis taenia)	0.2	1.5

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimal (m)	Vitesse d'écoulement maximale limite (m/s)
10	Able de Heckel (Leucaspis delineatus) Bouvière (Rhodeus amarus) Epinoche (Gasterosteus gymnotus) Epinochette (Pungitius laevis) Vairons (Phoxinus sp)	0.2	1.5

8.5 Vérification des critères de franchissement : Espèces prédéfinies

D'après "Informations sur la Continuité Écologique - ICE, Onema 2014".

TABLE 8.6 – Liste des groupe d'espèces prédéfinis

Groupe ICE	Espèces
1	Saumon atlantique (Salmo salar) Truite de mer ou de rivière [50-100] (Salmo trutta)
2	Mulets (Chelon labrosus, Liza ramada)
3a	Grande alose (Alosa alosa)
3b	Alose feinte (Alosa fallax fallax)
3c	Lamproie marine (Petromyzon marinus)
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (Salmo trutta)
4b	Truite de rivière [15-30] (Salmo trutta)
5	Aspe (Aspius aspius) Brochet (Esox lucius)
6	Ombre commun (Thymallus thymallus)
7a	Barbeau fluviatile (Barbus barbus) Chevaine (Squalius cephalus) Hotu (Chondrostoma nasus)
7b	Lamproie fluviatile (Lampetra fluviatilis)

Groupe ICE	Espèces
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>)
8c	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>) Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette sprirlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)

9 Dévalaison

9.1 Calcul de la perte de charge sur une grille de prise d'eau

La perte de charge ΔH due au plan de grille se calcule comme suit :

$$\Delta H = \xi \frac{V_1^2}{2g}$$

La vitesse débitante amont V_1 est calculée à partir du débit entonné Q , de la hauteur d'eau H_1 et de la largeur de la prise d'eau B à l'amont du plan de grille :

$$V_1 = \frac{Q}{H_1 \times B}$$

Le calcul du coefficient de pertes de charge ξ se fait à partir des caractéristiques de la grille. Pour une description complète des hypothèses, des formules et des limitations de la méthode, se référer au rapport de Raynal et al. (2012).

9.1.1 Grille conventionnelle

Plans de grille conventionnels : perpendiculaires à l'écoulement et peu inclinés par rapport à l'horizontale.

9.1.1.1 Formule

Le calcul des pertes de charges s'effectue à l'aide de la formule F1 de Raynal et al. (2012) :

$$\xi = a * K_O * K_\beta$$

Avec :

- ξ : coefficient de perte de charge totale (-)
- a : coefficient de forme des barreaux (-), voir ci-dessous le paragraphe "Profil des barreaux"
- K_O : coefficient de perte de charge dû à l'obstruction totale due aux barreaux, éléments longitudinaux et colmatage (-)
- K_β : coefficient de perte de charge dû à l'inclinaison de la grille par rapport à la verticale (-)

$$K_O = \left(\frac{O_C}{1 - O_C} \right)^{1.6}$$

Avec O_C le coefficient d'obstruction totale due aux barreaux, éléments longitudinaux et colmatage rapporté à la section d'écoulement (-) :

$$O_C = O + (1 - O) \times C$$

Avec :

- O l'obstruction globale de la grille, définie comme le ratio adimensionnel entre la surface immergée, effectivement apparente depuis l'amont, de tous les éléments de la grille (barreaux, entretoises, supports), et la surface immergée du plan de grille
- C le taux de colmatage

$$K_\beta = (1 - \cos \beta)^{0.39}$$

Avec β l'angle d'inclinaison de la grille par rapport à la verticale (°).

9.1.2 Grille orientée

Plans de grille orientés par rapport à l'écoulement et quasi-verticaux.

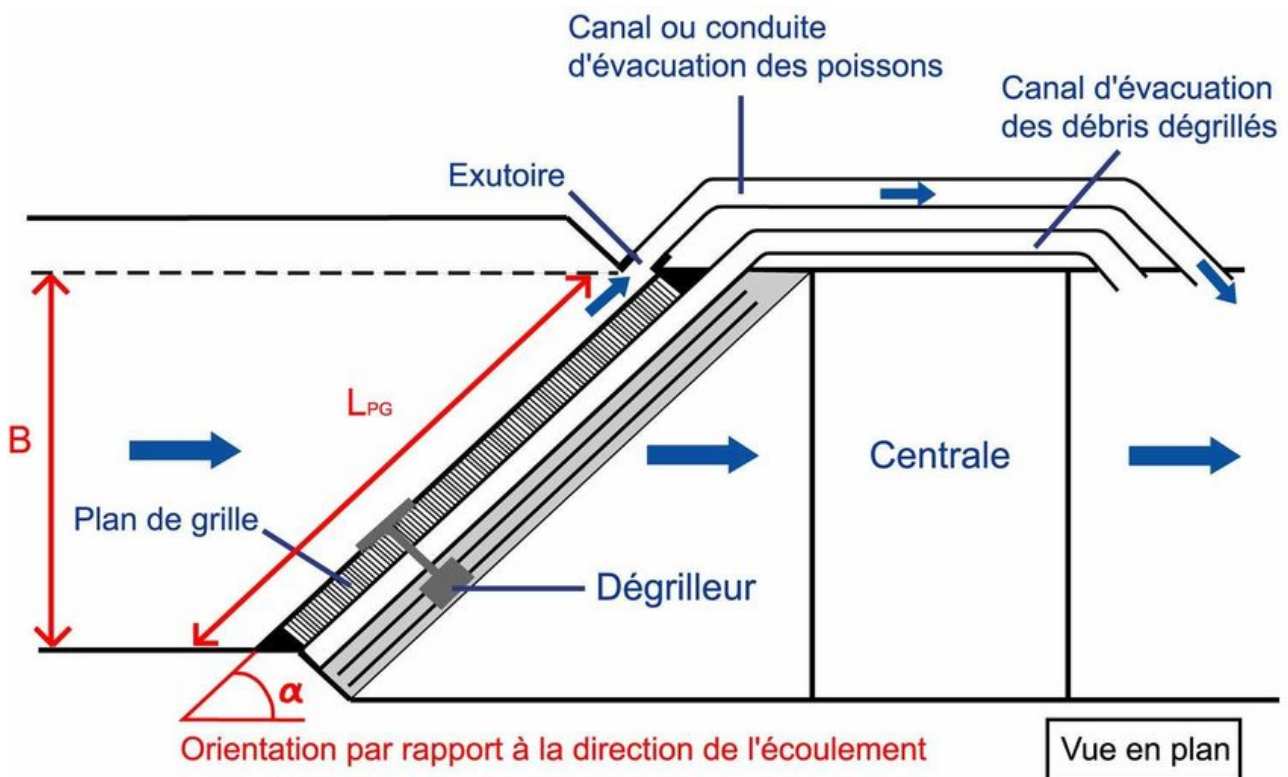


FIGURE 9.1 – Grille orientée

Courret, D. et Larinier, M. Guide pour la conception de prise d'eau ichtyocompatibles pour les petites centrales hydroélectriques, 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2359.1449>.

9.1.2.1 Formule

Le calcul des pertes de charges s'effectue à l'aide de la formule F2 de Raynal et al. (2012) ou encore de l'équation (7) de Raynal et al. (2013b)

$$\xi = a * K_O * K_\alpha$$

Avec K_α coefficient de perte de charge dû à l'inclinaison de la grille par rapport à l'horizontale (-)

$$K_\alpha = 1 + c * \left(\frac{90 - \alpha}{90} \right)^{2.35} * \left(\frac{1 - O}{O} \right)^3$$

Avec :

- α : angle d'inclinaison de la grille par rapport à l'horizontale (°)
- c : coefficient de forme des barreaux, voir ci-dessous le paragraphe "Profil des barreaux"

9.1.3 Grille inclinée

Plans de grille perpendiculaires à l'écoulement, et inclinés par rapport à l'horizontale

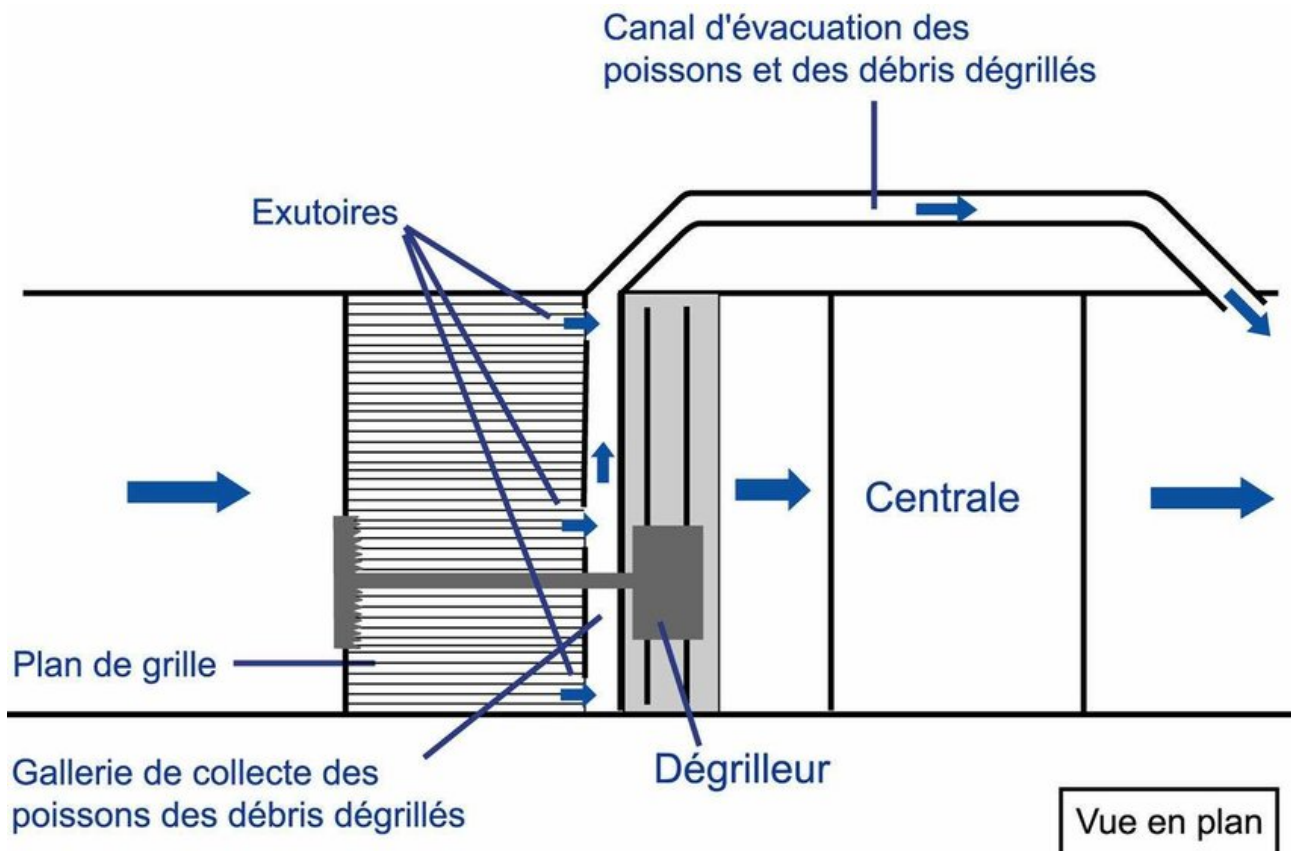


FIGURE 9.2 – Grille inclinée

Courret, D. et Larinier, M. Guide pour la conception de prise d'eau ichthyocompatibles pour les petites centrales hydroélectriques, 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2359.1449>.

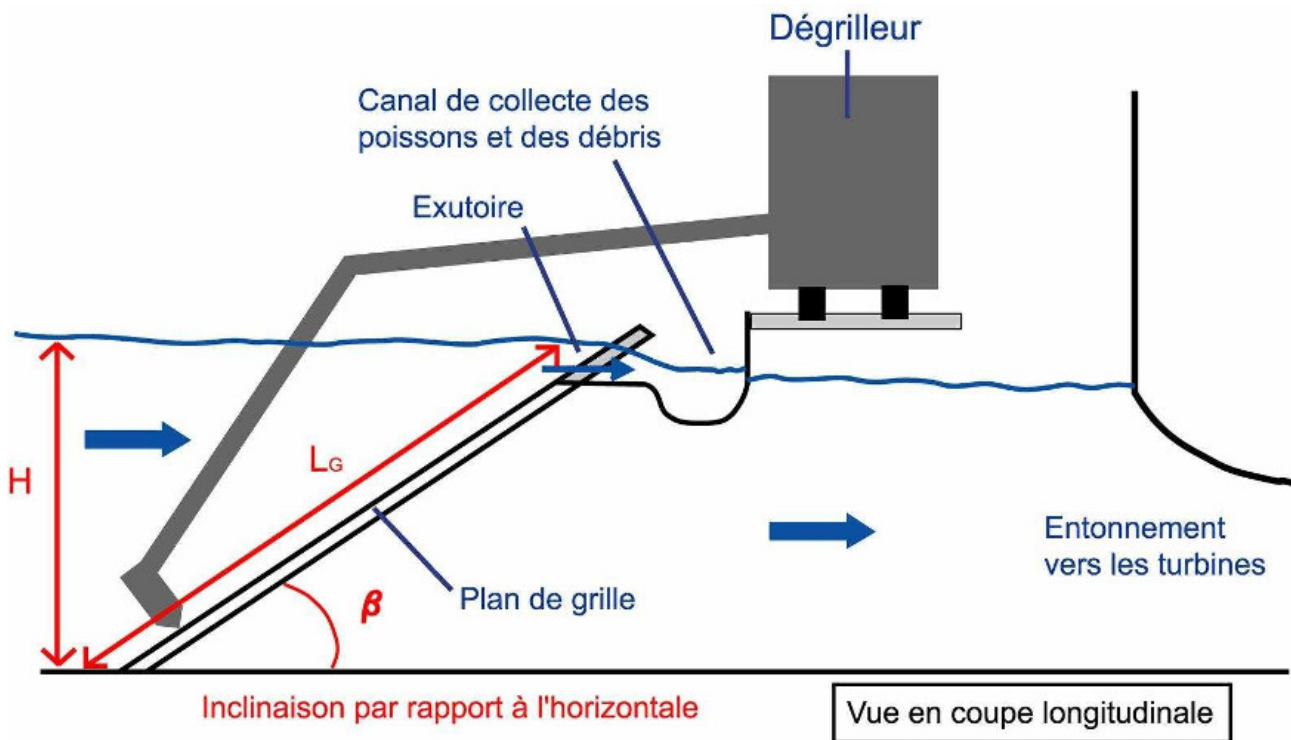


FIGURE 9.3 – Grille inclinée

9.1.3.1 Formule

Le calcul des pertes de charges s'effectue à l'aide de la formule F3 de Raynal et al. (2012) ou encore de l'équation (11) de Raynal et al. (2013a)

$$\xi = a * K_b * K_\beta + K_{Fent} * K_{entH}$$

Avec :

- K_b : coefficient de perte de charge dû à l'obstruction totale due aux barreaux, éléments longitudinaux et colmatage (-)
- K_{Fent} : coefficient de forme moyen des entretoises et éléments transversaux (-), voir ci-dessous le paragraphe dédié
- K_{entH} : coefficient de perte de charge dû aux entretoises et éléments de support transversaux (-)

$$K_b = \left(\frac{O_{b,C}}{1 - O_{b,C}} \right)^{1.65}$$

Avec $O_{b,C} = O_b + (1 - O_b) \times C$ et O_b l'obstruction due aux barreaux et autres éléments longitudinaux du plan de grille, définie comme le ratio adimensionnel entre la surface immergée, effectivement apparente depuis l'amont, de ces éléments, et la surface immergée du plan de grille.

$$K_\beta = (\sin \beta)^2$$

$$K_{entH} = \left(\frac{O_{entH}}{1 - O_{entH}} \right)^{0.77}$$

Avec O_{entH} l'obstruction effective due aux entretoises et éléments de support transversaux (rapportée à la section d'écoulement), voir ci-dessous le paragraphe dédié.

9.1.4 Paramètres

9.1.4.1 Cote du sommet immergé du plan de grille

Cette cote peut être différent du niveau d'eau si le sommet du plan de grille est noyé.

9.1.4.2 Largeur de la section B

Dans les configurations grille conventionnelle ou inclinée, la largeur de la section doit correspondre à la largeur du plan de grille.

9.1.4.3 Vitesse d'approche moyenne pour le débit maximum turbiné, en soustrayant la partie supérieure éventuellement obturée

C'est une valeur "maximalisée" de la vitesse d'approche prise en compte dans le calcul du perte de charge, dans une approche sécuritaire.

9.1.4.4 Inclinaison par rapport à l'horizontale

grille conventionnelle

Domaine de validité de la formule : $45 \leq \beta \leq 90^\circ$

grille orientée

Plans de grille verticaux ($\beta = 90^\circ$).

La légère inclinaison des plans de grille ($\beta \approx 75/80^\circ$), souvent mise en place pour des questions de dégrillage, peut être négligée.

grille inclinée

Domaine de validité de la formule : $15^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

Préconisation pour le guidage des poissons : $\beta \leq 26^\circ$

9.1.4.5 Orientation par rapport à la direction de l'écoulement

grille conventionnelle

Plans de grille perpendiculaires à l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$)

grille orientée

Domaine de validité de la formule : $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Préconisation pour le guidage des poissons : $\alpha \leq 45^\circ$

grille inclinée

Plans de grille perpendiculaires à l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$)

9.1.4.6 Vitesse normale moyenne pour le débit maximum turbiné V_N

Préconisation pour éviter le placage des poissons sur le plan de grille (barrière physique) ou leur passage prématuré au travers (barrière comportementale) : $V_N \leq 0.5$ m/s.

grille orientée ou inclinée

Au-delà de la valeur moyenne calculée ici, se reporter impérativement aux préconisations tirées de la caractérisation expérimentale des valeurs effectives de vitesses.

9.1.4.7 Rapport de forme des barreaux b/p

Avec b l'épaisseur et p la profondeur des barreaux.

grille orientée

Domaine de validité de la formule : rapport b/p voisin de 0.125

9.1.4.8 Rapport espacement/épaisseur des barreaux

grille orientée

Domaine de validité de la formule : $1 \leq e/b \leq 3$ avec e l'espacement libre entre les barreaux.

9.1.4.9 Obstruction globale du plan de grille pour les grilles conventionnelles et orientées

L'obstruction globale (barreaux + entretoises + éléments de supports longitudinaux et transversaux) retenue O est à déterminer à partir des plans de la grille. Elle doit être supérieure à l'obstruction due aux barreaux seuls qui est donnée par la formule $b/(b + e)$.

Domaine de validité de la formule pour les grilles conventionnelles : $0.2 \leq O \leq 0.60$

Domaine de validité de la formule pour les grilles orientées : $0.35 \leq O \leq 0.60$

9.1.4.10 Obstruction globale du plan de grille pour les grilles inclinées

Elle est décomposé en deux parties.

L'obstruction due aux barreaux et éléments de supports longitudinaux retenue O_b . A déterminer à partir des plans de la grille. Elle doit être supérieure ou égale à l'obstruction due aux barreaux seuls qui est donnée par la formule $b/(b + e)$. Domaine de validité de la formule : $0.28 \leq O \leq 0.53$.

L'obstruction effective due aux entretoises et éléments de support transversaux rapportée à la section d'écoulement à déterminer à partir des plans de la grille. Domaine de validité de la formule : $O_{entH} \leq 0.28$

9.1.4.11 Profil des barreaux

grille conventionnelle

Le coefficient de forme des barreaux a vaut 2.89 pour le profil rectangulaire (PR) et 1.70 pour le profil hydrodynamique (PH).

grille orientée

Le coefficient de forme des barreaux a vaut 2.89 pour le profil rectangulaire (PR) et 1.70 pour le profil hydrodynamique (PH).

Le coefficient de forme des barreaux c vaut 1.69 pour le profil rectangulaire (PR) et 2.78 pour le profil hydrodynamique (PH).

grille inclinée

Forme des barreaux	Droplet	Plétina	Tadpole 8	Tadpole 10	Hydrodynamique	Rectangulaire
Coefficient de forme A_i	2.47	1.75	1.27	1.79	2.10	3.85

Extrait de Lemkecher et al. (2020)

9.1.4.12 Coefficient de forme moyen des entretoises et éléments transversaux, pondérés selon leurs parts respectives

grille inclinée

A déterminer à partir des plans de la grille.

Vaut par exemple 1.79 pour les entretoises cylindriques, 2.42 pour les entretoises rectangulaires, et de l'ordre de 4 pour les poutres carrées et IPN.

9.1.5 Références

Raynal, S., Courret, D., Chatellier, L., Larinier, M., David, L., 2012. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles -Pertes de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles et champs de vitesse à leur approche (POLE RA11.02). https://continue-ecologique.fr/wp-content/uploads/2019/11/2012_014.pdf

Raynal, S., Courret, D., Chatellier, L., Larinier, M., David, L., 2013a. An experimental study on fish-friendly trashracks—Part 1. Inclined trashracks. Journal of Hydraulic Research 51, 56–66. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.753647>

Raynal, S., Chatellier, L., Courret, D., Larinier, M., David, L., 2013b. An experimental study on fish-friendly trashracks—Part 2. Angled trashracks. Journal of Hydraulic Research 51, 67–75. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.753646>

Lemkecher, F., Chatellier, L., Courret, D., David, L., 2020. Contribution of Different Elements of Inclined Trash Racks to Head Losses Modeling. Water 12, 966. <https://doi.org/10.3390/w12040966>

9.2 Impact de jet

Ce module effectue un calcul balistique d'un jet en négligeant les frottements dus à l'air. Il permet de calculer la valeur manquante parmi les grandeurs suivantes :

- Vitesse initiale au départ du jet (m/s)
- Pente initiale au départ du jet (m/m). A noter que, contrairement à la pente utilisée dans le module de calcul à surface libre, cette pente est positive pour un jet dirigé vers le haut et négative pour un jet dirigé vers le bas.
- Abscisse de l'impact ou distance horizontale parcourue entre le départ du jet et le point d'impact (m)
- Cote de départ du jet (m)
- Cote de l'eau (m)

La cote du fond est utilisée pour calculer la profondeur et le rapport profondeur / chute.

9.2.1 Dimensionnement d'un exutoire d'évacuation des poissons

L'exutoire d'évacuation des poissons vers l'aval se termine par un dispositif se jetant dans le canal de fuite de la centrale. Le présent module permet de calculer la position et la vitesse au point d'impact de la chute libre ou de la veine d'eau à la surface de l'eau du canal de fuite compte tenu de l'angle et de la vitesse initiaux du jet et de la hauteur de chute.

Extrait de Courret et Larinier (2008), p.24 :

Les vitesses dans l'ouvrage et au point d'impact dans le bief aval doivent rester inférieures à une dizaine de m/s, certains organismes préconisant même de ne pas dépasser 7-8 m/s (ASCE 1995). (...) La hauteur de chute entre le débouché et le plan d'eau ne doit pas dépasser une douzaine de mètres pour éviter tout risque de blessures des poissons à l'impact, quels que soient leur taille et leur mode de chute (chute libre ou chute dans la veine d'eau) (Larinier et Travade 2002). Le rejet doit également se faire dans une zone d'une profondeur suffisante

pour éviter tout risque de blessure par choc mécanique. Odeh et Orvis (1998) préconisent une profondeur minimale de l'ordre du quart de la chute, avec un minimum d'environ 1 m.

9.2.2 Formules utilisées

9.2.2.1 Hauteur de chute

$$H = 0.5 * g * \frac{D^2}{\cos^2 \alpha * V_0^2} - \tan \alpha * D$$

Avec :

- H : hauteur de chute (m) qui correspond à la différence de cote entre le départ du jet et la surface de l'eau
- g : accélération de la gravité = 9.81 m.s⁻²
- D : distance horizontale parcourue entre le départ du jet et le point d'impact (m)
- α : angle de tir par rapport à l'horizontale (°)
- V_0 : vitesse initiale (m/s)

9.2.2.2 Abscisse de l'impact (distance horizontale parcourue)

$$D = \frac{V_0}{g * \cos \alpha} \left(V_0 * \sin \alpha + \sqrt{(V_0 * \sin \alpha)^2 + 2 * g * H} \right)$$

9.2.2.3 Temps de vol

$$t = \frac{D}{V_0 \cos \alpha}$$

9.2.2.4 Vitesse horizontale à l'impact

$$V_x = V_0 \cos \alpha$$

9.2.2.5 Vitesse verticale à l'impact

$$V_z = V_0 \sin \alpha - t * g$$

9.2.2.6 Vitesse à l'impact

$$V_t = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}$$

9.2.3 Références

Courret, Dominique, et Michel Larinier. Guide pour la conception de prise d'eau ichtyo-compatibles pour les petites centrales hydroélectriques, 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2359.1449>

10 Outils mathématiques

10.1 Opérateurs et fonctions trigonométriques

Les opérateurs et fonctions mathématiques basiques pourvus par Cassiopée permettent avant tout de faciliter le lien entre les résultats d'un module de calcul et l'entrée dans autre dans le cas d'un enchaînement de calcul entre plusieurs modules. L'exemple fourni "Longueur de jet d'un déversoir" montre des utilisations du module "Fonction affine".

10.1.1 Fonction affine

Le module fonction affine résout l'équation de droite :

$$y = ax + b$$

Trois paramètres doivent être saisis et le module calcule le paramètre manquant.

10.1.2 Somme et produit de puissances

Ce module permet d'écrire une équation sommant des puissances sous la forme ax^n avec a , x , et n des réels.

Dans le cas d'une somme l'équation résolue par le module s'écrit :

$$y = \sum_{i=1}^k a_i x_i^{n_i}$$

Dans le cas d'un produit l'équation résolue par le module s'écrit :

$$y = \prod_{i=1}^k a_i x_i^{n_i}$$

Tous les paramètres doivent être saisis à l'exception du dernier qui est la valeur calculée dans l'équation.

10.1.3 Fonction trigonométrique

Ce module permet de calculer la valeur d'une fonction trigonométrique ou son inverse.

L'équation résolue par ce module s'écrit :

$$y = f(x)$$

Avec f , une fonction trigonométrique et x un angle en degré ou radian.

Le paramètre “Opération” permet de choisir l’opérateur parmi les fonctions disponibles sont : cos, sin, tan, cosh, sinh et tanh. Le paramètre “Unité” permet de choisir entre degré et radian.

10.2 Solveur multimodule

Le solveur multimodule permet de calculer la valeur d’un paramètre d’entrée d’un module dépendant d’une chaîne de calcul constituée de plusieurs modules pour laquelle on cherche à atteindre une valeur cible pour un paramètre calculé en sortie.

Le schéma ci-dessous reprend l’exemple d’une chaîne de calcul comprenant deux modules. Le module x prend entrée le paramètre `Input x` et calcule le paramètre `Output x`. Le module y prend entrée le paramètre `Input y` et calcule le paramètre `Output y`. Le paramètre `Input y` est lié au paramètre `Output x`. Le problème à résoudre par le solveur est d’obtenir la valeur de l’`Input x` permettant d’obtenir une valeur cible en `Output y`.

```
graph LR
  Ix([Input x]) --> x[Module x]
  x --> Ox([Output x])
  Ox --> y[Module y]
  y --> Oy([Output y])
  Oy -.->|Input x pour une valeur cible Output y ?| Ix
```

Pour résoudre ce problème, il faut définir les caractéristiques du paramètre cible qui comprennent :

- Le module et son paramètre calculé (Ici le module y calculant `Output y`);
- Le résultat ciblé qui peut être le paramètre calculé par le module où un de ces résultats complémentaire (Ici `Output y`);
- La valeur cible désirée.

Il faut aussi définir les caractéristiques du paramètre recherché :

- Le paramètre recherché est à choisir parmi la liste des paramètres en entrée des modules de la session (Ici le paramètre `Input x` du module x);
- Une valeur initiale de ce paramètre pour démarrer le calcul.

La valeur initiale choisie doit être assez proche de la solution car il n’y a aucune garantie que la fonction issue de l’enchaînement des calculs soit continue et monotone.

Des exemples d’utilisation du solveur multimodule sont présents dans les sessions exemples “Débit d’un chenal avec ouvrages” et “Pente critique d’un canal”. Les notes de ces sessions décrivent l’enchaînement des modules et l’utilisation du solveur.

11 Méthodes numériques de résolution

11.1 Schéma de Runge-Kutta d'ordre 4

Le schéma de Runge-Kutta d'ordre 4 est basée sur une approximation de la dérivée à un ordre supérieur (ordre 4). Le principe de la discrétisation est le même que pour la méthode d'Euler, mais on va faire quelques calculs supplémentaires pour approcher la dérivée :

- on connaît la fonction f , un point t_i où on connaît y_i
- on peut donc calculer $f_1 = y'_i = f(y_i, t_i)$ (cf. méthode d'Euler=pente au point (t_i, y_i))
- on calcule $f_2 = f(y_i + \frac{1}{2}\Delta t f_1, t_i + \frac{1}{2}\Delta t)$ (valeur estimée au milieu de l'intervalle, avec la pente prise en t_i)
- on calcule $f_3 = f(y_i + \frac{1}{2}\Delta t f_2, t_i + \frac{1}{2}\Delta t)$ (valeur estimée au milieu de l'intervalle $t_{i+1/2}$, avec la pente prise en $t_{i+1/2}$)
- on calcule $f_4 = f(y_i + \Delta t f_3, t_i + \Delta t)$ (valeur estimée en t_{i+1} , avec la pente prise en $t_{i+1/2}$)
- on a alors $y_{i+1} \simeq y_i + \frac{1}{6}\Delta t(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4)$
- on peut alors itérer (résoudre pas à pas) pour passer au point suivant. Le problème est initialisé en partant de t_0 où on connaît y_0 (condition à la limite).

On voit clairement que la méthode est beaucoup plus précise. Même avec un pas de calcul beaucoup plus élevé, on approche correctement la solution, alors que la méthode d'Euler donne des résultats très éloignés de la solution exacte. On remarque aussi que, entre les points de discrétisation, on a approché la solution par des segments de droite (bien qu'on puisse avoir une interpolation plus évoluée si on a besoin de connaître des valeurs intermédiaires).

Le programme peut s'écrire de la façon suivante, avec le logiciel de calcul scientifique Scilab :

```
// Programme de resolution d'une equation differentielle
// Equation a resoudre: dy/dt=f(y,t)

// Definition de la fonction f
a=-0.1;
function z=f(y,t);z=a*y; endfunction

// Condition à la limite:
t0=0;
y0=1;

// Discretisation du temps
tmax=50;
```

```

dt=5;

// Nombre de pas de discretisation
N=(tmax-t0)/dt;
// Indices
ii=1:N+1;
t=(ii-1)*dt; // vecteur temps

// vecteur temps avec un pas plus fin, pour la solution exacte
t2=0:tmax;

// Solution par méthode d'Euler, notée ye
ye(1)=y0; // condition à la limite
for i=1:N
    ye(i+1)=ye(i)+dt*f(ye(i),t(i));
end

// Solution par méthode RK4, notée yrk4
yrk4(1)=y0; // condition à la limite
for i=1:N
    f1=f(yrk4(i),t(i));
    f2=f(yrk4(i)+f1*dt/2,t(i)+dt/2);
    f3=f(yrk4(i)+f2*dt/2,t(i)+dt/2);
    f4=f(yrk4(i)+f3*dt,t(i)+dt);
    yrk4(i+1)=yrk4(i)+dt*(f1+2*f2+2*f3+f4)/6;
end

// Tracé des solutions
scf(2)
plot(t2,exp(a*t2),'k-',t, ye, 'kd-',t, yrk4, 'ks-')
title('Resolution par méthode de Runge-Kutta d\'ordre 4 - dy/dt=-0.1y')
xlabel('t')
ylabel('y')
legend('Solution exacte','Méthode Euler, dt=5','Méthode RK4, dt=5')

```

11.2 Méthode d'Euler explicite

Pour décrire un processus d'évolution, ou le profil d'une ligne d'eau, par exemple, on est souvent amené à résoudre une équation différentielle ordinaire (EDO) du premier ordre. Cette équation écrit comment varie une fonction, en un point donné (un instant ou un point de l'espace), connaissant la valeur de cette fonction mathématique, le problème à résoudre s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(y, t) \\ y(t = t_0) = y_0 \end{cases}$$

où $\frac{dy}{dt}$ désigne la dérivée par rapport à t de la fonction y (qui dépend de la variable t) ; la variable y_0 est appelée la condition à la limite ; elle conditionne la solution finale de l'équation.

Comme souvent on ne connaît pas de solution analytique de ce problème, on va utiliser des méthodes approchées pour estimer la solution. On fait donc une discrétisation de la variable t . On note ainsi Δt le pas de discrétisation, et on résout le problème aux points $t_0, t_1 = t_0 + \Delta t, t_2 = t_0 + 2\Delta t, \dots, t_n = t_0 + n\Delta t$ où n est un entier.

La méthode d'Euler explicite est la plus intuitive ; elle consiste à considérer que, d'un point t_i au point t_{i+1} , la fonction évolue linéairement, avec une trajectoire qui est celle qu'on peut calculer au point t_i .

Le problème se résout donc de la façon suivante :

- on connaît la fonction f , un point t_i où on connaît y_i
- on peut donc calculer $y'_i = f(y, t)$
- on estime alors la valeur de y au point $t_{i+1} = t_i + \Delta t$: $y_{i+1} \simeq y_i + y'_i \Delta t$
- on peut alors itérer (résoudre pas à pas) pour passer au point suivant. Le problème est initialisé en partant de t_0 où on connaît y_0 (condition à la limite).

On sent bien que ce schéma pourra donner de bons résultats uniquement si Δt n'est pas trop grand. Des valeurs de Δt trop grandes peuvent donner des résultats complètement faux, conduisant à des interprétations physiques erronées. Son intérêt est toutefois sa simplicité, et il s'implémente facilement sur un tableau.

11.2.1 Exemple d'application : processus exponentiel

Considérons le problème (simple) suivant :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -ay \\ y(t = t_0) = y_0 \end{cases}$$

On a donc ici $f(y, t) = -ay$. La solution analytique se résout facilement, donnant $y(t) = y_0 \exp(-a(t - t_0))$. On peut résoudre le problème par la méthode d'Euler :

- on choisit Δt (par exemple, $\Delta t = 1$)
- calculer $y_1 = y_0 - ay_0 \Delta t$
- calculer $y_2 = y_1 - ay_1 \Delta t$ etc.

On constate que la résolution n'est pas très précise ; ceci est lié au pas de calcul trop grand compte tenu de la méthode choisie et de l'équation à résoudre.

11.3 Méthode par intégration de trapèzes

La forme intégrale de l'équation différentielle ordinaire du premier ordre s'écrit :

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{dy}{dt} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(y, t)$$

La méthode des trapèzes donne :

$$y_{i+1} \simeq y_i + \frac{y'_i + y'_{i+1}}{2} \Delta t$$

11.4 Méthode de Brent

[Voir la définition sur Wikipedia](#)

11.5 Méthode de Newton

[Voir la définition sur Wikipedia](#)

12 Historique des versions

4.19.1 - 06/05/2025

12.0.0.1 Correction de bogues

- Régime uniforme : Affichage erroné des résultats quand un des paramètres varie ([jalhyd#381](#), [nghyd#681](#))

12.0.0.2 Changements internes

- Remove .htaccess file on deployment server ([nghyd#680](#))

4.19.0 - 03/03/2025

12.0.0.3 Nouvelles fonctionnalités

- Ajout de la passe à rugosité de fond ([jalhyd#340](#))
- RugoFond : Ajouter un avertissement sur les lignes d'eau trop élevées ([jalhyd#379](#), [nghyd#675](#))
- Espèce personnalisée : grouper les critères de PAB ([nghyd#457](#))
- Documentation > Lois d'ouvrages : homogénéiser schémas, formules et noms des lois ([nghyd#512](#))
- Solveur : Résultat ciblé : ne pas proposer le paramètre calculé ([nghyd#669](#))

12.0.0.4 Correction de bogues

- Courbe de remous - génération section paramétrée : la pente de fond n'est pas copiée ([jalhyd#366](#))
- Macrorugo Complexe : Non convergence du calcul ([jalhyd#368](#))
- Solveur : absence de message d'erreur à la non convergence ([jalhyd#369](#))
- Solveur : Les select d'une session chargée ne s'initialise pas ([jalhyd#374](#), [nghyd#668](#))
- Non fonctionnement des tests E2E suite à la mise à jour de NodeJS ([nghyd#646](#))
- Documentation > HTML : Les formules ne s'affichent pas dans le chapitre méthodes numériques ([nghyd#653](#))
- Documentation > PDF : erreur de notes de bas de page ([nghyd#655](#))
- Cassiopée doesn't work for languages other than French and English ([nghyd#667](#))
- Rugofond Multiple/Macrorugo complexe : affichage des unités sur les résultats complémentaires ([nghyd#676](#))

12.0.0.5 Changements internes

- Non fonctionnement des tests E2E suite à la mise à jour de NodeJS ([nghyd#646](#))
- Optimize waiting time for starting e2e tests ([nghyd#647](#))
- Mise à jour vers Angular 15 ([nghyd#659](#))
- Tests E2E : Error : Couldn't find a matching Chrome browser for tag "121.0.6167.184" on platform "Linux" ([nghyd#661](#))
- E2E tests are failing for one month ([nghyd#678](#))

4.18.0 - 2024-01-30

12.0.0.6 Nouvelles fonctionnalités

- Ajout du module courbe de remous d'une passe à macro-rugosité ([jalhyd#325](#), [nghyd#609](#), [nghyd#650](#), [nghyd#654](#))
- Add bundle maker for CassiopeeR ([jalhyd#360](#))
- Chargement d'une session : Afficher la page de note si elle existe au lieu du diagramme des modules ([nghyd#649](#))
- PreBarrage : autoriser les cotes de seuil inférieures à la cote de fond du bassin amont ([jalhyd#353](#), [nghyd#634](#))
- Electron : ajouter un message d'avertissement de transition vers PWA ([nghyd#640](#))

12.0.0.7 Correction de bogues

- L'URL <https://cassiopee.g-eau.fr/cassiopee-releases/> est accessible aléatoirement ([nghyd#624](#))
- PWA : Les bloqueurs de tracker empêchent la mise à jour de l'application ([nghyd#633](#))
- Vérificateur : la vérification ne devrait pas être possible quand aucune espèce n'est sélectionnée ([jalhyd#349](#), [nghyd#637](#))
- Prebarrage : erreur de calcul de la somme des débits sur plusieurs branches ([jalhyd#351](#))
- MacroRugo : erreur de calcul du Strickler équivalent ([jalhyd#361](#))
- Documentation PDF : erreurs à la compilation ([nghyd#656](#))

12.0.0.8 Documentation

- Grilles : ajouter les schémas de profil issus de Lemkecher et al. (2020) ([nghyd#594](#))
- Ajouter un exemple de passe à rangées périodiques ([nghyd#635](#))
- Vérificateur : ajouter un avertissement à l'utilisation ([nghyd#643](#))
- Mise à jour du logo de l'UMR G-EAU ([nghyd#651](#))

12.0.0.9 Changements internes

- Update chartjs zoom plugin to v2.0.1 ([nghyd#638](#))
- Importer le DockerFile utilisé pour le CI/CD de Cassiopée dans ngHyd ([nghyd#639](#), [nghyd#648](#))
- Clean npm dependencies ([jalhyd#356](#))
- CI : automatically publish jalhyd package on NPM ([jalhyd#359](#))

4.17.1 - 2023-11-20

12.0.0.10 Correction de bogues

- Cloisons : le champ "Cote de l'eau amont" n'est pas vide par défaut (jalhyd#355, nghyd#623)
- Le séparateur décimal est passé à la virgule sur certaines configurations (nghyd#628)

12.0.0.11 Changements

- Modifier l'avertissement de limite d'envoiement de Villemonte (jalhyd#350, nghyd#629)

12.0.0.12 Changements internes

- CI : change cache strategy for node modules (jalhyd#358, nghyd#630)

4.17.0 - 2023-05-30

12.0.0.13 Nouvelles fonctionnalités

- Structure : Ajout d'une erreur sur l'envoiement (jalhyd#302, nghyd#614)
- Conduites en charge : ajout de la loi de Strickler (jalhyd#215, nghyd#596)
- Ajout d'une redirection vers https pour les adresses http (nghyd#587)
- Courbe de remous : rendre facultatif l'une des deux conditions limites en cote (jalhyd#343, nghyd#610)
- Courbe de remous : visualiser les profils de sections (nghyd#496)
- Courbe de remous : renommer la ligne d'eau en ZW et fournir le tirant d'eau d'après celle ci (jalhyd#333)

12.0.0.14 Changements

- Prébarrages : interdire de supprimer le dernier bassin (nghyd#582)
- PAB : Alignement à droite des cellules numériques dans le tableau des bassins et cloisons (nghyd#583)
- PAB : Optimisation du tableau : déplacement de la colonne "cote de radier amont" (nghyd#615)

12.0.0.15 Correction de bogues

- Documentation : Les formules de math ne s'affichent pas dans la version anglaise (nghyd#608)
- Perte de charge : les paramètres de loi ne sont pas modifiés quand on change le type de perte (nghyd#611)
- Solveur multimodule : le module existe toujours après suppression (jalhyd#342, nghyd#601)
- Notes de session : la note ne s'affiche pas directement (nghyd#602)
- PWA : l'application ne se met pas à jour (nghyd#604)
- Traduction des résultats : tous les libellés ne sont pas modifiés quand on change de langue (nghyd#586)

- Un paramètre cible d'un lien ne doit pas se lier à un autre paramètre ([jalhyd#341](#), [nghyd#605](#))
- Application PWA inaccessible hors ligne ([nghyd#588](#))
- Régression : le fichier de session n'enregistre plus le type de section ([nghyd#592](#))
- PAB : la précision d'affichage a une influence sur la valeur des paramètres ([nghyd#543](#))
- Le bouton calculer est activé malgré un champ en erreur ([nghyd#616](#))
- Solveur multimodule : impossibilité d'utilisation sur un seul module ([nghyd#606](#))
- PreBarrage : Changement intempestif des paramètres d'ouvrage au changement d'équation ([nghyd#620](#))
- PreBarrage : il n'y a plus aucun résultat au niveau des cloisons ([nghyd#619](#))
- Passe à macrorugosités : des champs ne sont pas liables avec le module "Concentration de blocs" ([jalhyd#345](#))
- Passe à macrorugosité : la largeur doit avoir un centimètre de tolérance ([jalhyd#344](#))
- Structure : le chargement d'une session loi d'ouvrages avec Q varié remet Q en mode fixé ([nghyd#603](#))
- Structure : résultat du calcul de la cote amont dépendant de la cote initiale pour un débit nul ([jalhyd#219](#))
- Passe à bassins : message non défini dans la légende des graphiques ([nghyd#584](#))
- Les résultats ne sont pas réinitialisés quand on modifie des paramètres globaux ([jalhyd#331](#), [nghyd#574](#))
- PreBarrage : Doublement des avertissements ([jalhyd#348](#))

12.0.0.16 Documentation

- Passe à ralentisseurs : ajouter de liens vers les pages de documentation des types de passes ([nghyd#598](#))
- Perte de charge : documentation du module ([nghyd#597](#))
- Modification de la documentation sur le coefficient de débit d'une fente ([nghyd#595](#))
- Ajout d'une documentation pour l'installation de Cassiopée PWA ([nghyd#617](#))
- Perte de charge : Il manque l'aide dans le module perte de charge ([nghyd#593](#))
- Ajouter le numéro de version de Cassiopée sur la documentation ([nghyd#578](#))

12.0.0.17 Changements internes

- Restructurer Lechapt et Calmon pour de nouvelles lois de pertes de charge ([jalhyd#334](#), [jalhyd#590](#), [nghyd#585](#))
- Migration des tests e2e vers WebDriverIO ([nghyd#618](#))
- Documentation : localisation des dépendances javascript dans un seul dossier ([nghyd#612](#))
- Optimiser l'affichage des unités ([jalhyd#338](#))
- Fusionner les "select" avec "source" et les "select_custom" ([jalhyd#328](#), [nghyd#483](#))
- Docker : Supprimer les dépendances à l'application Android ([cassiopee2-integration#12](#))
- Supprimer les dépendances et la chaîne de compilation pour l'application Android ([nghyd#580](#))
- Suppression des warnings à la compilation ([nghyd#579](#))
- Tests E2E : Vérifier la cohérence entre le json de description des calettes et le flag visible des paramètres ([nghyd#550](#))
- Thème Angular Material personnalisé : avertissements dart-sass à la compilation ([nghyd#414](#))

4.16.3 - 2023-01-11

12.0.0.18 Correction de bogues

- Lechapt et Calmon : erreur de sélection de matériau ([jalhyd#337](#), [nghyd#589](#))

4.16.1 - 2022-11-16

12.0.0.19 Correction de bogues

- Un paramètre lié ne change pas d'état après la suppression du module cible ([jalhyd#329](#), [nghyd#571](#))
- Le mode lié d'un paramètre de section est perdu quand on change le type de section ([jalhyd#329](#), [nghyd#572](#))

12.0.0.20 Documentation

- Rajouter François Grand comme auteur de la documentation PDF ([nghyd#573](#))
- Ajouter les références pour les schémas des lois d'ouvrages ([nghyd#575](#))

4.16.0 - 2022-10-12 (*Anguilla anguilla*)

12.0.0.21 Nouvelles fonctionnalités

- PAB : ajout de la charge et l'envoiement dans le tableau de résultat et l'export ([jalhyd#324](#), [nghyd#518](#))
- Courbe de remous (et bief) : remontée d'une erreur quand le pas de discrétisation est supérieur à la longueur du bief ([jalhyd#316](#), [nghyd#565](#))
- Section paramétrée : profil de section : option axes orthonormés ([nghyd#497](#), [nghyd#568](#))
- URL de routeur "/loadsession" pour charger un exemple ([nghyd#476](#))
- Deploy devel branch on cassiopee-dev.g-eau.fr ([nghyd#564](#))

12.0.0.22 Correction de bogues

- Les caractères UTF8 ne sont pas imprimés dans la doc PDF ([nghyd#556](#))
- PréBarrages : La sélection de l'amont ou l'aval n'est pas visible au premier clic ([nghyd#560](#))
- Solveur : le paramètre recherché n'est pas conservé ([nghyd#555](#))
- PAB : Bugs de format du tableau NgPrime ([nghyd#562](#))
- Section paramétrée : crash de l'appli sur variation de paramètre ([jalhyd#319](#), [nghyd#561](#))
- Module avec une section : le mode champs vide ne fonctionne pas ([jalhyd#327](#), [nghyd#569](#))
- Déplacement du paramètre calculé lors de la duplication d'un Nub ([jalhyd#322](#), [nghyd#567](#))
- Lois d'ouvrages : mauvaise gestion du paramètre calculé sur suppression d'ouvrage ([jalhyd#321](#), [nghyd#566](#))

12.0.0.23 Changements

- Ouvrages : modification des types d'ouvrages (ajout de seuil/orifice rectangulaire, vanne rectangulaire renommée en vanne de fond rectangulaire) ([jalhyd#326](#), [nghyd#511](#))

- Prébarrages : regroupement de la saisie des bassins ([nghyd#522](#))

12.0.0.24 Documentation

- corrections diverses ([nghyd#559](#))
- MacroRugo : ajout d'un schéma rugosité de fond ([nghyd#524](#))
- Lois d'ouvrages : définition seuil mince/épais ([nghyd#514](#))
- Ajout d'un tableau synthétiques des lois d'ouvrages ([nghyd#513](#))
- MAJ de la documentation des grilles avec les données de Lemkecher et al. (2020) ([nghyd#438](#))

12.0.0.25 Changements internes

- Mise à jour vers Angular 14 ([nghyd#500](#))
- CI : MAJ de l'image Docker vers Debian Bullseye compatibilité TLS) ([cassiopee2-integration#10](#))
- Angular : compilation avec Ivy ([nghyd#369](#))
- Déplacer le répertoire Jalhyd dans celui de Nghyd ([nghyd#558](#))
- Déménagement de l'intégration continue sur les serveurs gitlab à Lyon ([nghyd#557](#))
- Mise à jour de Chartjs ([nghyd#554](#))
- MAJ vers PrimeNG 10 ([nghyd#481](#))

4.15.1 - 2022-07-04

12.0.0.26 Nouvelles fonctionnalités

- Structure : Modification de l'avertissement ennoisement ([jalhyd#314](#), [nghyd#520](#))
- Dialogue de paramètre variable : pouvoir valider avec la touche entrée ([nghyd#541](#))
- Journal de calcul repliable ([nghyd#519](#))

12.0.0.27 Changements

- MacroRugo : changer cote de radier par cote de fond ([nghyd#523](#))
- PAB, MacroRugo complexe et Prébarrages : modifier le message d'erreur synthétique ([nghyd#517](#))
- Error 404 on language files load ([nghyd#499](#))

12.0.0.28 Correction de bogues

- Plantage PAB si un paramètre est passé en mode variable puis annulé ([nghyd#549](#))
- Liens inaccessibles pour certains modules ([jalhyd#289](#), [nghyd#547](#))
- Plantage du calcul sur modules liés ([jalhyd#286](#))
- PréBarrages : les champs ne sont pas vides à la création du module ([jalhyd#310](#), [nghyd#546](#))
- L'annulation de la saisie du mode "Varier" mémorise les valeurs non valides ([nghyd#545](#))
- PréBarrages : les changements de couleur du schéma ne sont pas instantanées ([nghyd#544](#))
- Crash sur annulation du dialogue d'édition du paramètre variable pour un paramètre initialement en calcul ([nghyd#542](#))

- Le passage en mode varier devrait systématiquement ouvrir la boîte de dialogue ([nghyd#537](#))
- Lois d'ouvrages : les champs ne sont pas vides à l'ajout d'un ouvrage ([nghyd#536](#))
- PAR Calage et Simulation : répétition des paramètres dans le résultat ([nghyd#535](#))
- PAB nombre : mauvaise colonne de résultat ([jalhyd#304](#), [nghyd#534](#))
- MacroRugo complexe : le graphique des vitesses moyennes entre les blocs ne s'affiche pas ([nghyd#533](#))
- Cote amont/aval de bief : le bouton "détail d'une section hydraulique" ne fonctionne pas toujours ([nghyd#504](#), [jalhyd#311](#))
- PréBarrages : les valeurs erronées ne sont pas conservées ([nghyd#501](#))
- Solveur multimodule : le choix du paramètre recherché n'est pas maintenu à l'écran ([nghyd#486](#))
- Log : améliorer la synthèse de journal ([jalhyd#308](#))
- Les liens erronés sont remplacés par d'autres liens ([nghyd#551](#))
- PAB : Lancement du calcul possible avec des champs invalides ([nghyd#552](#), [jalhyd#317](#))

12.0.0.29 Changements internes

- Path error in stable deployment version on the dev server [nghyd#540](#)

4.15.0 - 2022-05-04 (*Salmo trutta*)

12.0.0.30 Nouvelles fonctionnalités

- PAB : Variation du débit d'attrait ([nghyd#431](#))
- Ajouter un bouton "Annuler" sur la saisie des paramètres variables ([jalhyd#300](#), [nghyd#507](#))
- Prébarrages : mettre les enfants invalides en rouge dans le schéma ([jalhyd#298](#), [nghyd#484](#))

12.0.0.31 Changements

- Fente Larinier : laisser le coefficient de débit vide ([nghyd#515](#))
- Cloisons : Générer une PAB : vider les champs ([jalhyd#306](#), [nghyd#516](#))

12.0.0.32 Correction de bogues

- Courbe de remous : crash de l'application sur données erronées ([jalhyd#307](#), [nghyd#532](#))
Deux bugs en un, l'appli crashe quand :
 - la hauteur de berge dépasse une certaine valeur avec des paramètres corrects pour effectuer un calcul (par exemple les valeurs par défaut)
 - les deux cotes de l'eau se situent sous les cotes de fond amont et aval
- Sections : non convergence du calcul du tirant d'eau critique ([jalhyd#301](#), [nghyd#528](#))
- Remettre le paramètre dans son état initial quand le dialogue "Varier" est annulé ([nghyd#508](#))
- Prébarrages : les champs ne sont pas vides lors des ajouts de bassins et cloisons ([nghyd#503](#))
- Mode "champs vides par défaut" : changer le type d'un ouvrage (ex : dans Cloisons) remplit les champs ([nghyd#480](#))

- PréBarrages : perte du focus lorsqu'on édite un paramètre d'un enfant (cloison ou bassin) ([nghyd#469](#))

12.0.0.33 Documentation

- Cloisons : il manque l'aide contextuelle pour les lois de débit ([nghyd#529](#))
- Documentation : corrections ([nghyd#498](#))

12.0.0.34 Changements internes

- Nightly build : clean folder before installation ([nghyd#495](#))
- Transfert du site de production sur OVH ([nghyd#505](#))
- Plantage des tests e2e sur le chargement des exemples ([nghyd#530](#), [nghyd#531](#))
 - Les champs des exemples chargés sont vides lorsque le mode "champ vides" est activé.
 - Les tests e2e plantent par manque de temporisation
- CI : les jobs build en schedule de master et devel plantent ([nghyd#527](#))
- CI : affiner la gestion du cache ([nghyd#526](#))

4.14.2 - 2021-03-25

12.0.0.35 Nouvelles fonctionnalités

- Passe à macro-rugosité : Retour aux formules utilisées dans la v4.13.1 ([jalhyd#297](#), [nghyd#493](#))

12.0.0.36 Correction de bogues

- Passe à macro-rugosité : error de calcul de la vitesse max ([jalhyd#294](#))
- Graphiques : lorsqu'on relance un calcul les axes ne se mettent pas à jour ([nghyd#489](#))

12.0.0.37 Documentation

- Macrorugo : Documentation de Cd0 avec schéma ([nghyd#492](#))

4.14.1 - 2021-02-17

12.0.0.38 Nouvelles fonctionnalités

- Passe à macro-rugosité : Changer Cd0 pour Cx et ajuster Cd0 aux données expérimentales ([jalhyd#291](#))

12.0.0.39 Correction de bogues

- Vérificateur de passe : message erroné pour les passes à macro-rugosités submergées ([jalhyd#292](#))

4.14.0 - 2021-02-16 (*Scomber scombrus*)

12.0.0.40 Nouvelles fonctionnalités

- Passe à macro-rugosité : Mise à jour des formules de calcul (jalhyd#283)
- Passe à macro-rugosité : Ajout de la vitesse moyenne entre les blocs (jalhyd#285)
- Passe à macro-rugosité : Ajout du Strickler équivalent dans les résultats liables à des Strickler (jalhyd#287)
- Passe à macro-rugosité : ajout d'un avertissement pour les concentrations en dehors de l'intervalle validé par les expérimentations (jalhyd#284)
- Vérificateur : Les passes à macro-rugosité submergées sont non franchissables (jalhyd#290)

12.0.0.41 Correction de bogues

- Passe à macro-rugosité : Calcul de la puissance dissipée erroné (jalhyd#282)
- Crash au chargement d'un module contenant une parenthèse dans son nom (nghyd#487)
- Electron : l'icône de l'application n'est plus reconnue (nghyd#485)

12.0.0.42 Documentation

- Documentation du solveur multi-module et des modules de calcul mathématiques (nghyd#433)
- Macrorugo : documenter le coefficient de forme $Cd0$ (nghyd#477)
- MacroRugo : erreur de formule de correction de Cd dans la documentation (nghyd#488)
- Documentation du module de calcul de la cote amont / aval d'un bief (nghyd#490)

4.13.1 - 2020-10-02

12.0.0.43 Correction de bogues

- PreBarrage : Distribution des débits erronée sur exemple simple (jalhyd#279)
- PreBarrage : erreur de calcul sur $Z2 > Z1$ initiale (jalhyd#280)
- Prebarrage : avec Chrome (et electron) le schéma est mal rendu (nghyd#482)

4.13.0 - 2020-09-24 (*Michel Larinier*)

12.0.0.44 Nouvelles fonctionnalités

- Module Pré-barrage (jalhyd#32, jalhyd#269, jalhyd#268, jalhyd#243, jalhyd#246, nghyd#395, nghyd#430, nghyd#456, nghyd#455, jalhyd#275, jalhyd#276, jalhyd#277, jalhyd#278, nghyd#452, nghyd#470, nghyd#451)
- Simplification de l'architecture des composants de résultats Angular (nghyd#418, nghyd#466, nghyd#465)
- Modifier les titres et descriptions de "Passes à bassins" et "Passes à macro-rugosités" (nghyd#478)
- Ajouter des mots-clés "maths" pour les outils mathématiques (moteur de recherche) (nghyd#474)

12.0.0.45 Correction de bogues

- Electron : la détection de mise à jour disponible ne fonctionne plus ([nghyd#462](#))
- Débit lié au débit en calcul d'un PréBarrage : erreur dans CalcSerie() ([jalhyd#274](#))
- Cloisons : changer le type d'ouvrage pour Seuil Triangulaire casse le fieldset ([nghyd#479](#))

12.0.0.46 Documentation

- Prébarrages ([nghyd#467](#))
- Aide du Jet / de la pente : mentionner l'inversion de la pente pour le module Jet ([nghyd#475](#))
- Ajouter à l'accueil de la documentation un chapitre "contact, bugs, remarques. . ." ([nghyd#472](#))

4.12.1 - 2020-09-15

12.0.0.47 Correction de bogues

- Lien vers la documentation cassé sur Chrome et Edge ([nghyd#458](#))
- Macrorugo : en mode "champs vides par défaut", L est en calcul avec une valeur initiale vide ([nghyd#459](#))
- Grille : différencier Ob de O pour les grilles inclinées ([jalhyd#273](#))
- Fermeture d'un module Jet calculé : plante l'application ([nghyd#460](#))
- Déversoir dénoyé : Infinity pour des largeurs de lit faible et sur variation ([jalhyd#272](#))

12.0.0.48 Documentation

- Lechapt-Calmon : documentation du coefficient de pertes de charges singulières ([nghyd#338](#))

4.12.0 - 2020-09-09 (Les critères de Francis Blanche - ils peuvent le faire !)

12.0.0.49 Nouvelles fonctionnalités

- Vérification des critères de franchissement des passes à poissons ([jalhyd#204](#), [nghyd#60](#), [jalhyd#236](#), [jalhyd#251](#), [jalhyd#238](#), [jalhyd#252](#), [jalhyd#250](#), [jalhyd#258](#), [jalhyd#247](#), [jalhyd#239](#), [jalhyd#249](#), [jalhyd#248](#), [jalhyd#254](#), [jalhyd#235](#), [jalhyd#237](#), [nghyd#402](#), [jalhyd#216](#), [nghyd#426](#))
- Moteur de recherche sur la page d'accueil ([nghyd#428](#))
- Améliorer le système de traduction ([nghyd#223](#))
- Labels des paramètres : lire l'unité dans le modèle et non dans les fichiers de traduction ([nghyd#417](#))
- Cloisons : remplacement de la loi Cunge80 par la loi CEM88D ([jalhyd#264](#))

12.0.0.50 Correction de bogues

- Cordova : la notification de mise à jour ne fonctionne plus ([nghyd#436](#))
- Conditionner le passage en mode CALC aux liens déjà définis, pour éviter les boucles ([nghyd#181](#))

- Solveur : le paramètre recherché, si c'est un extraResult, ne s'initialise pas correctement lors du chargement d'une session ([jalhyd#263](#))
- Solveur : this.prms.X is undefined ([jalhyd#262](#))
- Exemple "débit d'un chenal avec ouvrages" : plusieurs bugs ([nghyd#446](#))
- PAR, générer une simulation à partir d'un calage : NaN ([nghyd#447](#))
- Paramètres liés d'un enfant à l'autre d'un même module : boucle infinie si la source varie ([nghyd#444](#))
- JaLHyd : dans createStructure(), définir automatiquement le structureType en fonction de la loiDebit
- Lors de la vérification d'une passe à bassins variée, bug sur la vérification de charge minimale ([jalhyd#265](#))
- PAB, calcul de cloison qui échoue : l'erreur ne dit pas quelle cloison est en cause ([jalhyd#267](#))
- Vérification d'une PAB variée : erreur dans la vérification des critères obligatoires ([jalhyd#266](#))
- Vérification de PAB : rendre la largeur minimale d'échancrure obligatoire ([jalhyd#270](#))

12.0.0.51 Documentation

- Documentation de la vérification des passes ([nghyd#434](#))
- Traduire la documentation des PAR ([nghyd#443](#))
- Harmonisation de l'indentation des fichiers ([nghyd#409](#))

12.0.0.52 Mises à jour de dépendances

- Angular 10
- Cordova 10
- Electron 10
- Mathjax 3 ([nghyd#416](#))

4.11.1 - 2020-08-11

12.0.0.53 Nouvelles fonctionnalités

- Lois d'ouvrages : ajouter le n° d'ouvrage dans les logs ([jalhyd#260](#), [nghyd#442](#))

12.0.0.54 Correction de bogues

- Erreur de formulation de la loi de Cunge en orifice dénoyé ([jalhyd#259](#))
- Définition de la valeur initiale d'un calcul ([nghyd#440](#))
- Structure et Dever : exposer les résultats pour liage ([jalhyd#255](#))
- Déversoirs dénoyés : Ajouter les liens vers les lois de débit ([nghyd#437](#))

12.0.0.55 Documentation

- Mise à jour de la documentation de la loi de Cunge ([nghyd#441](#))

4.11.0 - 2020-07-28 (Puisque tu PAR)

12.0.0.56 Nouvelles fonctionnalités

- Calage d'une passe à ralentisseurs (jalhyd#34, jalhyd#223, jalhyd#225, jalhyd#226, jalhyd#232, jalhyd#233, jalhyd#234, jalhyd#240, nghyd#365, nghyd#394, nghyd#408, nghyd#422, nghyd#423, nghyd#424, nghyd#425)
- Simulation d'une passe à ralentisseurs (jalhyd#201, jalhyd#229, nghyd#366, nghyd#382, nghyd#394, nghyd#425)
- Bief : lier les paramètres de section pour les Sections Paramétrées générées (nghyd#380)
- Permettre de lier des paramètres de sections de types identiques, sans utiliser les familles (jalhyd#203, nghyd#379)

12.0.0.57 Correction de bogues

- Lien entre deux paramètres de section : la valeur n'apparaît pas dans le tableau de résultats (nghyd#381)
- Désactiver le suivi Matomo lorsqu'Angular n'est pas en mode "prod" (nghyd#412)
- Corriger le coefficient de débit de la vanne submergée (jalhyd#231, nghyd#421)
- Cloisons : une pelle (négative) est calculée pour les orifices, ce qui donne lieu à des avertissements (jalhyd#242)
- Empêcher de créer des liens vers des paramètres invisibles (jalhyd#244)
- MRC : après un calcul varié, il n'y a plus d'eau sur certains radiers (jalhyd#253, nghyd#432)

12.0.0.58 Documentation

- Passes à ralentisseurs (nghyd#398)

4.10.6 - 2020-07-21

12.0.0.59 Nouvelles fonctionnalités

- Transférer les fonctionnalités de cassiopee-2-integration dans Gitlab-CI (nghyd#374)

12.0.0.60 Correction de bogues

- Lechapt-Calmon : ne plus proposer de matériau "NONE" (jalhyd#230)

12.0.0.61 Documentation

- Renommer les lois d'ouvrage (nghyd#419)
- Erreur dans l'équation de Cunge
- Corrections mineures sur Vanne Dénoyée

4.10.5 - 2020-06-30

12.0.0.62 Nouvelles fonctionnalités

- Renommer les lois triangulaires “dénoyées” en “(Villemonte)” (jalhyd#210, nghyd#393)
- Lois d'ouvrages : ajout du seuil triangulaire épais (jalhyd#211, nghyd#399)
- Régime Uniforme, conduite circulaire : provoquer une erreur fatale si la conduite est en charge (jalhyd#214, nghyd#406)
- Cunge 1980 : ajout dans les cloisons et modification du coefficient de débit à 1 (jalhyd#220, jalhyd#221, nghyd#404)

12.0.0.63 Correction de bogues

- PAB : résultats cassés (nghyd#392)
- PAM : Supprimer le lien rugosité de fond (nghyd#391)
- Cloisons : avertissement si les cotes de radier des seuils se situent sous la cote de radier du bassin amont (jalhyd#217)
- Absence d'erreur en cas de code de langue manquant dans les listes déroulantes (nghyd#400)
- Contrôler le domaine de définition lors de l'affectation de .singleValue (jalhyd#218)
- Ouverture de vanne et liens : bug sur longueur du paramètre varié (jalhyd#222)
- Exemple “Longueur de jet d'un déversoir” cassé (jalhyd#224)
- Exemple 3 : l'affichage de graphique clignote (nghyd#407)
- Définition de la pente (jalhyd#212)

12.0.0.64 Documentation

- Documentation de la pente (nghyd#397)
- Documentation de la loi Cunge80 (nghyd#403)
- Documentation des grilles : il manque la définition des variables (nghyd#401)

4.10.4 - 2020-04-17

12.0.0.65 Nouvelles fonctionnalités

- Régime uniforme : ajouter un bouton pour créer une section paramétrée (nghyd#386)
- Cordova : notifications de mise à jour (nghyd#384)

12.0.0.66 Correction de bogues

- Section paramétrée : le tirant d'eau critique ne converge pas sur une section circulaire fermée (jalhyd#209)
- Régime uniforme : erreur de calcul de la vitesse (jalhyd#206, jalhyd#207)
- Impact de jet : problème de gestion des erreurs fatales (jalhyd#205)
- Unité du coefficient de Strickler (jalhyd#208)
- Robustifier le solveur sur la recherche de l'intervalle de départ (jalhyd#164)
- Champ vide à la création d'un module : les champs de section ne sont pas vides quand on choisit un type de section (nghyd#388)
- Section paramétrée : Ajouter le tirant d'eau dans le schéma en coupe de la section (nghyd#389)

- Saisie paramètre qui varie : message d'erreur persistant sur le champ min ([nghyd#385](#))
- Cordova : version erronée ([nghyd#383](#))

12.0.0.67 Documentation

- Fusionner "Section paramétrée" et "Variables hydrauliques" ([nghyd#390](#))
- Sections : documentation du champ Hauteur de berge

4.10.3 - 2020-03-12

12.0.0.68 Nouvelles fonctionnalités

- Nouveau raccourci clavier Alt+G pour afficher le diagramme des modules
- Diagramme des modules : lien vers les notes
- Test e2e des exemples officiels ([nghyd#373](#))
- Exemples types mis à jour, avec notes

12.0.0.69 Correction de bogues

- Calcul d'un module aval qui casse les résultats du module amont ([nghyd#371](#))
- Astérisques sur les champs non-obligatoires ([nghyd#368](#))
- Exemple "Débit d'un chenal avec ouvrages" : impossible de calculer la cote amont dans le module "Cotes d'un bief" ([jalhyd#202](#))
- Déversoirs et Lois d'ouvrages : liens erronés vers la documentation du seuil dénoyé
- Jet : ne pas remplir "sous" la ligne de fond, lorsque sa cote est négative ([nghyd#372](#))
- Passage en mode calcul d'un paramètre dont la singleValue est undefined ([nghyd#367](#))
- Marges sur les titres de Fieldset, Fieldset container, PAB Table
- Désactivation des notifications lorsqu'on vide la session ([nghyd#375](#))
- Chargement d'un Solveur avant ses Nubs cibles
- Sélection de la cible du Solveur lorsque le Nub calculé n'a pas de paramètre calculé (ex : Section Paramétrée) ([nghyd#378](#))
- Section Paramétrée : tableau de résultats fixes en plusieurs exemplaires lors de l'utilisation avec le Solveur ([nghyd#377](#))
- Bief : calcul des sections amont et aval ([nghyd#376](#))

4.10.2 - 2020-02-25

12.0.0.70 Correction de bogues

- Correction de liens erronés vers la documentation

12.0.0.71 Documentation

- Documentation : ajout de liens vers la page de téléchargement

4.10.1 - 2020-02-25

12.0.0.72 Correction de bogues

- Electron : erreur de détection de mise à jour (comparaison chaînes semver)

4.10.0 - 2020-02-24 (Langue Hilare Neuve)

12.0.0.73 Nouvelles fonctionnalités

- Solveur : cibler un résultat complémentaire ([nghyd#363](#), [jalhyd#188](#))
- *Monkey test* sur les interfaces ([nghyd#235](#))
- Lechapt-Calmon : ajouter un avertissement lorsque la vitesse est en dehors de l'intervalle [0.4, 2] ([jalhyd#192](#))
- Rendre plus générique la gestion des listes déroulantes ([nghyd#359](#))
- Automatiser les chemins de configuration depuis le CalculatorType ([nghyd#358](#))

12.0.0.74 Correction de bogues

- Certains liens doivent être cliqués deux fois ([nghyd#364](#))
- Solveur : interdire de travailler sur un Nub dont le résultat est varié ([jalhyd#198](#))
- Paramètre varié et lien à un résultat varié simultanément ([jalhyd#199](#))
- Parfois lorsqu'on charge une session, le bouton Calculer reste grisé ([nghyd#349](#))
- PAB : parfois le type de jet est undefined ([jalhyd#196](#))
- Export XLSX : retirer "help" des entêtes de colonnes ([nghyd#360](#))
- Chargement de session : selon l'ordre des paramètres, le paramètre calculé n'est pas correctement défini

12.0.0.75 Documentation

- Générer la documentation en PDF ([nghyd#348](#))

12.0.0.76 Mises à jour de dépendances

- Angular 9 ([nghyd#354](#))
- Typescript 3.7 ([jalhyd#197](#))
- mise à jour de toutes les dépendances jalhyd/nghyd sauf Mermaid (provoque un bug) et Mathjax (adaptations importantes nécessaires)

4.9.0 - 2020-01-15 (On Fusionne Bien)

12.0.0.77 Nouvelles fonctionnalités

- Nouveau module "Concentration de blocs" ([jalhyd#185](#))
- Lechapt-Calmon : ajout des pertes de charge singulières ([nghyd#352](#), [jalhyd#172](#))
- Simplification du code des Formulaires ([nghyd#353](#))
- Passage de l'AFB à l'OFB : changement de logo, de nom, d'URL

12.0.0.78 Documentation

- Documentation utilisateurs en anglais ([nghyd#321](#))
- Réorganisation de la documentation utilisateurs ([nghyd#355](#))
- Documentation développeurs ([nghyd#317](#))
- Exemples de code Typescript et Javascript pour le développement d'applications en ligne de commande basées sur JaLHyd
- Diagramme de classes simplifié de JaLHyd

12.0.0.79 Mises à jour de dépendances

- Jasmine 3.5
- Karma 4.4

4.8.1 - 2019-12-20

12.0.0.80 Nouvelles fonctionnalités

- Dever : Ajout d'un avertissement si la cote de radier d'un ouvrage est sous la cote de fond du lit ([jalhyd#179](#))
- Strickler : Ajout d'une aide contextuelle ([nghyd#332](#))
- Grille : permettre les calculs partiels ([nghyd#336](#))
- MacroRugo : Ajout d'avertissement sur l'adéquation taille des cellules - largeur de la rampe ([jalhyd#174](#))
- Documentation lois d'ouvrages manquantes ([nghyd#342](#))
- Champs vides à la création d'un module ([nghyd#331](#))
- Dever : Calcul du débit corrigé en utilisant la charge dans les formules ([jalhyd#52](#), [nghyd#345](#))
- Grille : Ajouter le coefficient de forme des barreaux dans les résultats complémentaires ([jalhyd#178](#))
- Grille : Ajouter un profil de barreaux personnalisé ([nghyd#334](#))
- PAB : Ajouter la position du radier des seuils sur le graphique du profil en long ([jalhyd#171](#))
- Impact de jet : Modification des champs de hauteurs ([jalhyd#181](#))
- Hydraulique à surface libre : ajouter un avertissement quand ça déborde ([jalhyd#180](#))
- Cloisons : Ajouter le calcul de la pelle ([jalhyd#169](#))
- MacroRugoCompound : radier incliné - Ajouter le calcul du dévers latéral ([jalhyd#177](#))
- MacroRugo : Supprimer les débits et vitesses du guide technique ([jalhyd#177](#))
- MacroRugo : Domaine de définition de Cd0 ([jalhyd#175](#))
- PAB nombre : Ajout du nombre de chutes harmonisé ([jalhyd#167](#))
- MacroRugoComplexe : modification du libellé des champs ([nghyd#333](#))
- PAB : Export du tableau de géométrie au format XLSX ([jalhyd#170](#))
- MacroRugo : transition douce entre régime émergent et régime submergé ([jalhyd#191](#))

12.0.0.81 Correction de bogues

- Parfois, lorsque le débit varie, la PAB n'a pas d'eau à l'aval pour certaines valeurs de débit ([jalhyd#187](#))

- Lorsqu'on vide un champ, si on change de page, au retour le champ est à nouveau rempli ([nghyd#343](#))
- Impact de chute : Erreur de calcul de la chute nécessaire pour atteindre l'abscisse d'impact ([jalhyd#183](#))
- Impact de jet : non prise en compte de l'angle ([jalhyd#182](#))
- Grille : Pas d'invalidation des résultats sur le choix du profil des barreaux ([nghyd#335](#))
- MacroRugoCompound : radier incliné - changer la répartition des cellules ([jalhyd#173](#))

4.8.0 - 2019-11-26 (Affine et forte à la fois, par amour du remous)

12.0.0.82 Nouvelles fonctionnalités

- Module Fonction affine ([jalhyd#160](#), [nghyd#319](#))
- Module Trigonométrie ([jalhyd#161](#))
- Module Somme et produit de puissances ([jalhyd#162](#))
- Loi Déversoir noyé ([jalhyd#165](#), [nghyd#318](#))
- Logo animé lors du chargement de l'application ([nghyd#322](#))

12.0.0.83 Correction de bogues

- MacroRugo : définition de la valeur par défaut de Cd0 à 1.2 ([jalhyd#166](#))
- Échec du calcul en chaîne dans certains cas ([nghyd#325](#))
- Remous : suppression de LargeurBerge dans le log ([nghyd#326](#))
- Remous : les tirants d'eau critique et normal sont erronés sur le graphique ([nghyd#327](#))
- Remous : une fois calculé, chaque rechargement du module ajoute une copie des logs ([nghyd#324](#))
- Remous : en fluvial uniquement avec forte pente, les abscisses sont fausses ([nghyd#328](#))
- Calcul en chaîne : ERR inopiné dans le tableau de résultats fixes ([nghyd#329](#))

4.7.0 - 2019-10-29 (AGB - Agence Grolandaise pour la Biodiversité)

12.0.0.84 Nouvelles fonctionnalités

- Solveur multi-modules ([jalhyd#152](#), [nghyd#301](#))
- Nouvelle loi d'ouvrage : Orifice Dénoyé ([jalhyd#156](#), [nghyd#311](#))
- Script de déploiement d'une nouvelle version (sur Aubes) ([cassiopee2-integration#9](#))
- Documentation lois d'ouvrages CEM88 V et D ([nghyd#315](#))
- Remous : connecter le ressaut sur un seul point lorsque le ressaut est court (une seule abscisse) ([nghyd#312](#))

12.0.0.85 Correction de bogues

- Lois d'ouvrages : bug à l'affichage des résultats variés lorsque le calcul échoue ([jalhyd#163](#))
- PAB : problème de cotes sur les cloisons ([jalhyd#158](#))
- Calcul en chaîne : stopper la chaîne si une erreur survient ([jalhyd#155](#))
- Diagramme de Jet / de Section : problème de rafraîchissement ([nghyd#308](#))
- Remous : il manque parfois une abscisse ([jalhyd#147](#))

12.0.0.86 Mises à jour de dépendances

- chartjs-plugin-zoom 0.7.4

4.6.1 - 2019-10-15

12.0.0.87 Nouvelles fonctionnalités

- Suivi des comportements des utilisateurs à l'aide de Matomo (sur Aubes) ([nghyd#306](#))
- Documentation : faciliter l'accès à l'application plutôt qu'à GitLab ([nghyd#307](#))

12.0.0.88 Mises à jour de dépendances

- chartjs-plugin-zoom 0.7.4

4.6.0 - 2019-10-14 (Bluefish délavé)

12.0.0.89 Nouvelles fonctionnalités

- Ajout du module Bief ([jalhyd#55](#), [nghyd#299](#))
- Ajout du module Grille ([jalhyd#114](#), [nghyd#289](#))
- Ajout du module Impact de Jet ([jalhyd#112](#), [nghyd#287](#))
- Ajout du module : Pente ([jalhyd#143](#), [nghyd#295](#))
- Passage des courbes de remous en cotes ([jalhyd#146](#), [nghyd#298](#))
- SectionParametree : remplacement de Yf et Yt par Ycor ([jalhyd#145](#), [nghyd#297](#))
- Régime uniforme : ajout de la vitesse moyenne ([jalhyd#139](#))
- Page d'accueil : ajout du logo du pôle (IMFT), remplacement du texte [nghyd#208](#))
- Tests e2e sur les messages de langues absents ([nghyd#294](#))
- Ajout de la possibilité d'un bouton d'aide dans les résultats ([nghyd#293](#))
- Electron : mise à jour automatique ([nghyd#250](#))
- Intégration continue : exécution des tests e2e ([nghyd#278](#))
- Préférences : application de "precision" et "newtonMaxIter" à la Session en cours ([jalhyd#40](#), [nghyd#286](#))
- Lorsqu'un paramètre varie, ajout dans le log global d'un résumé des erreurs/avertissements ([jalhyd#140](#))

12.0.0.90 Correction de bogues

- MacroRugo : écart des débits en submergé ([jalhyd#154](#))
- MacroRugo : non convergence du calcul pour les faibles profondeurs ([jalhyd#144](#))
- Remous : crash avec paramètre lié à un résultat non calculé ([jalhyd#151](#))
- Remous : lorsque la longueur du bief n'est pas un multiple du pas de discrétisation, exécuter le calcul sur la dernière abscisse tout de même ([jalhyd#153](#))
- Remous : parfois le premier point de la courbe torrentielle est absent ([jalhyd#148](#))
- Cordova : le zoom sur les graphiques n'est pas réinitialisable ([nghyd#270](#))
- Chargement de session : déduire le type de structure (nodeType) de la loi de débit ([nghyd#265](#))
- Lechapt-Calmon : effacer les résultats lorsqu'on change de matériau ([nghyd#291](#))

- Lois d'Ouvrages : les logs ne s'affichent pas ([jalhyd#120](#), [nghyd#284](#))
- Lois d'ouvrages : calculer un paramètre enfant en variant la cote aval fait planter les résultats ([nghyd#285](#))

12.0.0.91 Mises à jour de dépendances

- chartjs-plugin-zoom 0.7.4
- ngx-markdown 8.2.1
- electron 6.0.10

4.5.0 - 2019-09-09 (Fish ramps that rock !)

12.0.0.92 Nouvelles fonctionnalités

- Passe à macro-rugosité complexe ([jalhyd#35](#), [nghyd#271](#))
- Réorganisation des onglets par glisser-déposer ([nghyd#206](#))
- Raccourcis clavier ([nghyd#192](#))
- Ajout des graphiques de type "Points" ([nghyd#118](#))
- Passe à bassins : Supprimer simultanément plusieurs bassins ([nghyd#269](#))
- Sessions exemples ([nghyd#165](#))
- Diagrammes des modules de calcul et de leurs liens ([nghyd#140](#))
- Amélioration de la précision d'affichage ([nghyd#281](#), [nghyd#29](#))
- Ouverture d'un fichier de session pour chargement : prévenir si le fichier est vide ou mal formé ([nghyd#264](#))

12.0.0.93 Correction de bogues

- Lechapt-Calmon : le sélecteur de matériaux n'a plus de sélection par défaut ([nghyd#276](#))
- Lechapt-Calmon : enregistrement de la propriété "matériaux" ([jalhyd#138](#))
- Lois d'ouvrages : plantage sur deux paramètres qui varient ([nghyd#273](#))
- Passe à bassins : prise en compte de la longueur des bassins dans l'interpolation ([nghyd#268](#))
- Passe à bassins : il manque l'édition de la cote de radier de la cloison aval ([nghyd#277](#))
- Résultats fixés : l'unité des paramètres calculés n'est pas affichée ([nghyd#274](#))

4.4.2 - 2019-08-06

12.0.0.94 Nouvelles fonctionnalités

- Boutons d'aide sur tous les éléments graphiques ([nghyd#157](#))
- Chargement de session : ouverture automatique du premier module nouvellement chargé
- Touche Tab dans un champ de saisie : le texte est surligné ([nghyd#259](#))
- Simplification des fichiers de session
- Graphique : afficher tous les paramètres d'une même famille simultanément ([nghyd#246](#))
- Réorganisation du format des résultats ([jalhyd#128](#))
- Erreur au chargement de session avec lien sur des paramètres calculés ([nghyd#263](#))

- Enregistrement de session partielle avec liens tronqués : enregistrer les valeurs courantes des paramètres ([jalhyd#133](#))

12.0.0.95 Correction de bogues

- Documentation de la passe à Macrorugosités
- Enregistrement de session : dédoublonner les messages concernant les dépendances
- nodeType est lu depuis la Section et plus depuis le Nub parent ([jalhyd#124](#))
- Electron / Cordova : script npm pour mettre à jour les mimetypes dans dist/index.html ([nghyd#258](#))
- Passe à bassins : traduction
- Graphiques : ne pas représenter les données de type ENUM ([nghyd#260](#))
- Remous : l'itérateur d'abscisses est en retard sur le dessin du graphe ([nghyd#267](#))

4.4.1 - 2019-07-30

12.0.0.96 Nouvelles fonctionnalités

- Passe à bassins : ajouter un accès rapide aux différents panneaux (table, résultats, graphiques...) pour éviter de faire défiler péniblement ([nghyd#237](#))
- Passe à bassins : permettre d'ajouter / dupliquer un ouvrage pour plusieurs cloisons à la fois ([nghyd#243](#))
- Passe à bassins : ajouter la nature du jet ([nghyd#245](#))
- Lois d'ouvrages : Ne pas écraser les valeurs par défaut du coefficient de débit au changement de loi ([nghyd#225](#))
- Lois d'ouvrages : Ajouter le type de jet dans les résultats complémentaires des ouvrages ([jalhyd#92](#))
- Amélioration du titre et de l'icône de l'application ([nghyd#257](#))

12.0.0.97 Correction de bogues

- Ne pas exposer les paramètres de cloisons pour les rendre liables ([nghyd#247](#), [jalhyd#111](#))
- Passe à macro-rugosités : erreur de calcul ([nghyd#247](#))
- Passe à bassins : Le journal de calcul ne s'efface pas quand les données d'entrée changent ([nghyd#241](#))
- Courbes de remous : les inputs ne sont plus pris en compte ([nghyd#256](#))
- Invalidation de calcul bien qu'absence de lien de résultat ([jalhyd#98](#))
- Lois d'ouvrages : Erreur de calcul des lois de seuil / vanne ([jalhyd#118](#))
- Lechapt-Calmon : le sélecteur de matériaux ne charge plus les coefficients, depuis la 4.4.0a ([nghyd#231](#))
- Cloisons : Erreur de calcul de la charge ([jalhyd#127](#))
- Cloisons : Erreur de calcul de la cote de radier si la charge est en calcul ([jalhyd#126](#))
- Passe à macro-rugosité : Écart entre le débit calculé et celui du guide technique ([jalhyd#113](#))
- Passe à macro-rugosité : Erreurs de calcul ([jalhyd#85](#))
- Paramètre varié : le champ d'édition de la liste de valeurs s'affiche mal ([nghyd#244](#))
- Paramètres liables : parfois le mat-select est trop étroit et on ne sait pas ce qu'on est en train de choisir ([nghyd#248](#))

12.0.0.98 Mises à jour de dépendances

- Angular 8.1.2

4.4.0 - 2019-07-16 (Basse à Sapins)

12.0.0.99 Nouvelles fonctionnalités

- Module “Passe à bassins”
- Plusieurs paramètres peuvent varier simultanément
- Implémentation de la vanne levante
- Implémentation de la loi de Villemonte sur les seuils triangulaires et triangulaires tronqués
- Remplacement de la cote de radier par la charge sur les seuils de cloisons
- Remplacement de la dichotomie par la méthode de Brent
- Simplification de la loi Kivi pour les cloisons et les PAB
- Déploiement avec Electron : paquets installables pour Windows 32 bits et Linux (.deb)
- Déploiement avec Cordova : paquet .apk (non signé) pour Android
- Zoom sur les graphiques
- Bouton d’aide dans la barre de navigation, lorsque la session est vide
- Carte de bienvenue lorsque la session est vide : logos et mentions légales
- Système de rapport de bugs par email
- Paramètres liés : affichage de la valeur, icônes d’information
- Compilation : allègement de la bibliothèque Mathjax embarquée
- Magnifique icône en SVG
- Option pour désactiver les notifications à l’écran
- Nouveaux tests

12.0.0.100 Correction de bogues

- Correction erreur de calcul de ZDV
- Corrections d’erreurs liées au cycle de vie d’Angular
- Structures en parallèle : interdiction de supprimer le dernier ouvrage
- Mode plein écran compatible avec les navigateurs plus anciens
- Amélioration de la robustesse de l’enregistrement / chargement de session
- Suppression du lissage sur les graphiques de type “scatter”
- Nettoyage de code
- Limitation de la précision numérique à différents endroits

4.3.0 - 2019-04-12 (Éditions LLL)

12.0.0.101 Nouvelles fonctionnalités

- Module “Passe à bassin : chute”
- Module “Passe à bassin : nombre de bassins”
- Amélioration du filtre de choix des paramètres liables
- Vérification de la cohérence des paramètres liés au chargement de session
- Validation et invalidation en cascade des modules de calcul liés
- Calcul en cascade automatique des modules de calculs liés

- Transfert de ngHyd vers JaLHyd des mécanismes gérant les états des paramètres des modules de calcul
- Ajout des tags de version dans le panneau latéral
- La touche TAB permet de passer directement d'un champ de saisie à un autre
- Le bouton "+" disparaît sur la page d'accueil

12.0.0.102 *Correction de bogues*

- Divers bogues autour des paramètres liés
- Mise à jour intempestive des paramètres calculés dans le formulaire de saisie
- Précision d'affichage des données dans les infobulles

4.2.0 - 2019-03-11

12.0.0.103 *Nouvelles fonctionnalités*

- titres courts pour les modules, suffixe numérique automatique
- Lechapt-Calmon : amélioration du sélecteur de matériau
- affichage des valeurs liées
- détection de la langue du navigateur
- mémorisation des paramètres par le navigateur
- mécanisme de langue de secours pour les modules non traduits
- paramètres variables : courbe d'évolution
- graphiques de résultats : choix libre de l'abscisse et de l'ordonnée

12.0.0.104 *Correction de bogues*

- déplacement de la sérialisation au niveau du modèle (JaLHyd)
- nouvelle gestion des langues : plus robuste, charge moins de fichiers inutiles, ajout d'un cache
- meilleure gestion de la session et de la hiérarchie (ouvrages en parallèle / parent)
- gestion homogène de la touche entrée dans les formulaires : déclenche le calcul
- la précision Pr est traitée comme un paramètre normal
- simplification de la gestion des types d'ouvrages
- désérialisation des ouvrages en parallèle
- validation des ouvrages en parallèle
- validation des paramètres variables
- simplification et suppression de code inutilisé
- affichage des icônes et polices hors-ligne
- conservation du type de graphe lorsqu'on change de module
- ajout de tests exhaustifs sur le calcul des paramètres et le clonage des modules

4.1.0 - 2019-02-20

12.0.0.105 *Nouvelles fonctionnalités*

- interface : angular-material, angular-flex, charte graphique Irstea
- nouvelle page de liste, modules groupés par thèmes

- ajout du module Passe à Enrochement
- bouton pour vider la session
- bouton pour cloner un module de calcul
- fichier de configuration JSON, gestion d'une langue par défaut
- paramètre variable : amélioration des listes de valeurs
- affichage des graphiques et des tableaux de résultats en plein écran
- export des graphiques en PNG
- export des tableaux de résultats vers Excel
- utilisation de chaînes pour les UID
- utilisation de routerLink et des fragments d'URL (#)
- ajout de tests e2e avec Protractor
- limitation de la précision dans les graphiques

12.0.0.106 Correction de bogues

- redirection des URL invalides vers /list
- chargement de paramètres liés
- sauvegarde et chargement des valeurs des paramètres
- IDs uniques dans les champs de formulaires
- nettoyage du code (tslint)
- suppression de code inutilisé
- renommage et simplification de classes
- amélioration de la traduction

12.0.0.107 Mises à jour de dépendances

- Angular 7.2
- Compodoc
- angular-material
- angular-flex
- suppression de MDBBootstrap
- suppression de FontAwesome

4.0.0 - 2018-07-23

13 Mentions légales et conditions d'utilisation

13.1 Éditeur

Le site cassiopee.g-eau.fr dénommé ci-après « Cassiopée » est édité par l'UMR G-EAU (Unité Mixte de Recherche Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages) :

Irstea Centre de Montpellier 361, rue Jean-François Breton BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5 France

Tél : +33 (0) 4 67 04 63 00

Directeur de publication : Marcel Kuper, Directeur de l'UMR G-EAU

Responsable du projet de développement : David Dorchies

Développeurs : David Dorchies, François Grand, Mathias Chouet, Jean-Pascal Aubry

Cassiopée est un outil proposé par l'OFB (Office Français de la Biodiversité) dans le cadre des conventions OFB-Irstea (Action n°100 de la convention 2016-2018 et Action n°21 de la convention 2019-2021).

13.2 Hébergement

Irstea Centre de Montpellier Direction des systèmes d'information 361, rue Jean-François Breton BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5 France

13.3 Contenus du logiciel Cassiopée

L'OFB et l'UMR G-EAU proposent l'accès à des outils de calcul dans le domaine de l'hydraulique et plus spécifiquement des outils d'aide au dimensionnement de passes à poissons.

L'accès des internautes au site et aux outils de Cassiopée est gratuit et illimité pour tous les usages privés comme professionnels, dès lors que cet accès se fait par les seuls outils et interfaces du site cassiopee.g-eau.fr.

Sauf mention contraire, la propriété intellectuelle du contenu des pages est détenue par l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA).

13.4 Limitation de responsabilité

L'UMR G-EAU s'engage à fournir les moyens nécessaires et raisonnables pour assurer ou faire assurer un accès continu au site cassiopee.g-eau.fr et à ses contenus pour l'utilisateur.

L'UMR G-EAU ne pourra toutefois être tenu pour responsable à l'égard des utilisateurs en cas d'interruption, de défaillance, de défaut éventuel de qualité des services de Cassiopée pour quelque raison que ce soit, y compris pour des raisons de maintenance, d'entretien ou de mise à jour des serveurs.

Sauf mention contraire, les contenus de Cassiopée sont publiés à titre d'information, à l'exclusion de toute garantie sur leur exactitude ou leur adéquation aux besoins spécifiques des utilisateurs du site cassiopee.g-eau.fr. Les contenus de Cassiopée n'engagent en aucun cas la responsabilité des producteurs en cas de dommage direct ou indirect découlant de leur non-conformité à la réalité du terrain.

Si vous constatiez une erreur ou une omission dans les outils et contenus de Cassiopée, nous vous remercions de le signaler via la fonction « Signaler un problème » disponible dans le menu principal de Cassiopée.

13.5 Informations personnelles des utilisateurs

13.5.1 Données recueillies par Cassiopée

Le site cassiopee.g-eau.fr ne recueille aucune donnée personnelle sur l'utilisateur hormis l'adresse IP de la machine utilisée pour se connecter sur le site, les modules de calcul utilisés ainsi que le nombre de calcul lancés.

Les données et les calculs effectués par Cassiopée sont entièrement réalisés sur la machine de l'utilisateur et ne sont transmis ni à l'hébergeur, ni à aucun autre tiers.

La soumission d'un rapport de bug via la fonction « Signaler un problème » invite l'utilisateur à transmettre par mail le contenu de sa session de travail en cours à l'équipe de développement de Cassiopée. L'utilisateur peut choisir de ne pas transmettre sa session en supprimant le texte du mail situé sous la ligne `--- État de la session en cours - ne pas modifier le texte ci-dessous ---`. L'adresse électronique transmise par l'utilisateur à l'équipe de développement ne sera en aucun cas transmise à des tiers ou utilisée à d'autres fins que pour contacter l'utilisateur dans le cadre du problème signalé.

13.5.2 Données stockées sur le terminal de l'utilisateur

Cassiopée ne stocke aucune information sur le terminal de l'utilisateur hormis les paramètres de l'application si ceux-ci sont explicitement sauvegardés par l'utilisateur.

Tout ou partie de la session de travail de l'utilisateur peut être enregistrée par l'utilisateur sur tout support à sa convenance (fichier au format json) et rechargé ensuite pour un usage ultérieur.

13.6 Liens hypertextes

13.6.1 Liens de *cassiopee.g-eau.fr* vers d'autres sites

Les liens insérés dans les pages du site *cassiopee.g-eau.fr* vers des sites tiers sont proposés à titre d'information ; le contenu des sites vers lesquels ces liens conduisent n'engage pas la responsabilité de l'UMR G-EAU.

13.6.2 Établir un lien vers *cassiopee.g-eau.fr*

L'établissement d'un hyperlien vers Cassiopée est libre et gratuit à la condition que cet hyperlien permette l'ouverture d'une nouvelle fenêtre de visualisation et que l'affichage de l'URL *cassiopee.g-eau.fr* dans la nouvelle fenêtre soit lisible par l'internaute dès son ouverture et tout au long de l'accès aux données de Cassiopée.

L'UMR G-EAU se réserve le droit de faire supprimer un hyperlien vers Cassiopée qui serait de nature à nuire à sa politique éditoriale ou à porter atteinte à son image.

13.7 Marques et logotypes

Les marques et logotypes figurant sur le site permettent d'informer quant à l'origine des données et des logiciels utilisés ; elles n'ont aucun caractère publicitaire et sont propriété de leurs détenteurs respectifs.

13.8 Copies d'écran et impressions

Les contenus produits par Cassiopée (Résultats de calculs, tableaux, graphiques. . .) sont réutilisables et diffusable sur tout support sans aucune limitation.

La documentation de Cassiopée est publiée sous [Licence CC BY-NC-ND 4.0](#) qui autorise à copier, distribuer, communiquer tout ou partie de la documentation par tous moyens et tous formats à condition de la créditer, d'intégrer un lien vers la licence, de ne pas en faire un usage commercial, et de ne pas l'avoir modifiée.

13.9 Logiciels libres

13.9.1 Licence du module de calcul de Cassiopée

Cassiopée est basé sur une bibliothèque nommée JaLHyd (pour JAVascript Library for HYDraulics) développée en Typescript par l'équipe de développement de Cassiopée. Cette bibliothèque est publiée sous [licence GNU AGPL 3](#) et le code source est disponible sur simple demande à l'éditeur de Cassiopée.

13.9.2 Outils et bibliothèques tiers

Cassiopée a été développé à l'aide de nombreuses bibliothèques et outils du libre dont :

- Typescript
- Visual Studio Code
- Angular
- Angular Material
- Chart.js
- MathJax

Table des figures

1.1	Bandeau supérieur de l'application avec le menu, la liste des modules ouverts et le bouton pour ajouter un nouveau module	12
1.2	Paramètres du module de calcul de la chute d'une passe à bassin	13
1.3	Définition des valeurs min, max et du pas pour un paramètre à varier	14
1.4	Définition d'une liste de valeurs pour un paramètre à varier	14
1.5	Résultat d'un calcul pour des grandeurs fixées	15
1.6	Résultat d'une série de calculs pour un paramètre qui varie	16
2.1	Schéma conduite	20
3.1	Schéma en coupe longitudinale d'un tronçon rectiligne	28
3.2	Section rectangulaire	29
3.3	Section circulaire	29
3.4	Section trapezoidale	29
4.1	Schéma du type de jet	35
4.2	Schéma orifice noyé	37
4.3	Schéma de la fente noyée	38
4.4	Schéma de l'échancrure	38
4.5	Formule de Kindsvater-Carter : Schéma déversoir	41
4.6	Formule de Kindsvater-Carter : Abaques	42
4.7	Formule de Villemonte : schéma seuil noyé	43
4.8	Schéma orifice noyé	44
4.9	Schéma orifice dénoyé	44
4.10	Schéma de la fente noyée	45
4.11	Figure 1	46
4.12	Figure 2	47
4.13	Schéma du seuil noyé	48
4.14	Vue en perspective d'un déversoir triangulaire	49
4.15	Coefficient d'ennoiement pour un déversoir triangulaire à crête épaisse (d'après Bos, 1989)	50

4.16 Schéma d'un seuil triangulaire tronqué	51
4.17 Schéma CEM 88 V	52
4.18 Abaque de l'enneigement pour la formule Cemagref-V	54
4.19 Schéma CEM 88 D	54
4.20 Graphique CEM 88 D	56
4.21 Schéma vanne dénoyée	58
4.22 Schéma vanne noyée	59
4.23 Formule de Villemonte : schéma seuil noyé	60
5.1 Schéma orifice noyé	63
5.2 Schéma de la fente noyée	64
5.3 Schéma de l'échancrure	64
5.4 Barre d'outil d'édition de la géométrie de la passe à bassins	65
6.1 Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations	70
6.2 Organigramme de la méthode de calcul	72
6.3 Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations	79
6.4 Schéma coupe longitudinale d'une passe à rugosités de fond	80
7.1 Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil)	87
7.2 Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 10%	88
7.3 Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 15%	89
7.4 Abaques d'une passe à ralentisseurs plans (Denil) pour une pente de 20%	90
7.5 Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs Fatou	92
7.6 Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 10%	93
7.7 Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 15%	94
7.8 Abaques d'une passe à ralentisseurs Fatou pour une pente de 20%	95
7.9 Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs à fonds suractif	96
7.10 Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 10%	97
7.11 Abaques d'une passe à ralentisseurs à fond suractif pour une pente de 15%	98
7.12 Caractéristiques d'une passe à ralentisseurs mixte ou à chevrons	101
7.13 Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 10%	102
7.14 Abaques d'une passe à ralentisseurs mixte pour une pente de 16%	103
9.1 Grille orientée	126
9.2 Grille inclinée	127
9.3 Grille inclinée	128

Liste des tableaux

3.1	Tableau de Chow (1959)	30
4.1	Liste des équations d'ouvrages	39
8.1	Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins	108
8.2	Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins, en jet de surface	112
8.3	Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à bassins, en jet plongeant	117
8.4	Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à ralentisseurs	118
8.5	Liste des valeurs prédéfinies pour les critères de franchissement d'une passe à macrorugosités	120
8.6	Liste des groupe d'espèces prédéfinis	123



UMR G-EAU

361 rue J-F Breton - BP 5095
34196 Montpellier cedex 5
tél. : +33(0)4670400

Rejoignez-nous sur :



www.g-eau.fr
www.inrae.fr

Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

