

FICHE
N°1

Calcul des pertes de charge des grilles inclinées colmatées

Étude sur le colmatage des prises d'eau ichtyocompatibles
Thèse 2022-2025 menée par Guillaume Bon



Mai 2025

Table des matières

1	Les objectifs de cette fiche.....	3
2	Explications sur la construction de la formule de prédiction des pertes de charge de grilles colmatées.....	4
2.1	Description des essais en laboratoire.....	4
2.2	Construction de la formulation.....	6
2.3	Observations sur les dynamiques de colmatage	8
3	Utilisation de la formule des pertes de charge	9
3.1	Estimation de l'obstruction de colmatage	10
3.1.1	Estimation qualitative	10
3.1.2	Estimation quantitative (traitement d'images).....	10
3.2	Calcul pour des configurations sans masque de haut de grille.....	12
3.2.1	Colmatage homogène.....	12
3.2.2	Colmatage non homogène.....	13
3.3	Calcul pour des configurations avec masque de haut de grille	15
3.3.1	Colmatage homogène ou non.....	15
4	Conclusion	18

Thèse : Guillaume Bon

Encadrants :

France Hydro Electricité : Xavier Casiot, Cécile Bellot
Institut Pprime, UPR3346, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA : Ludovic Chatellier, Laurent David
Laboratoire SIAME, Université de Pau et Pays de l'Adour E2S UPPA-IPRA : Yves Le Guer

Consulter l'ensemble du contenu web lié à la thèse sur :

https://www.france-hydro-electricite.fr/etude_g.bon

Cette fiche présente de façon opérationnelle une partie des résultats de la thèse de Guillaume BON soutenue en 2025. Elle fait partie d'un ensemble de 4 fiches, à destination des bureaux d'études et porteurs de projets, pour les aider dans l'appropriation des résultats et leur mise en œuvre dans des projets.

1 Les objectifs de cette fiche

Contexte de cette fiche : la mise en place des nouveaux systèmes de dévalaison, et tout particulièrement des grilles fines avec des espacements entre les barreaux de 20 mm, a exacerbé les problématiques de colmatage naturel, telles que l'accumulation de feuilles, de plantes aquatiques et de galets sur ces infrastructures. L'effet de ce colmatage sur la production des centrales hydroélectriques en période automnale, et/ou, lors de forts transports de sédiments dans les rivières, est non négligeable et peut impacter le bon fonctionnement des centrales.

Pour estimer cet impact, une étude expérimentale en laboratoire a été mise en place. Elle repose sur l'utilisation de surfaces de colmatage artificielles représentant le colmatage naturel (plaques perforées, volume poreux, plaque pleine, etc.). Cette étude a été complétée par des mesures de terrain sur le colmatage naturel et son effet sur une centrale en fonctionnement.

Objectif de la fiche : l'objectif de cette fiche est de résumer ces essais et d'expliquer comment l'estimation des pertes de charge (équivalentes aux pertes de hauteur d'eau) pour des grilles inclinées partiellement colmatées peut être effectuée. Elle vise notamment à montrer comment utiliser la loi de perte de charge pour estimer les pertes de charge des grilles naturellement colmatées.

Pour cela, une première partie présentera la fabrication de la loi et la méthode d'estimation de l'obstruction par colmatage sur les prises d'eau en fonctionnement. Ensuite, des exemples d'application de la loi seront exposés. Un tableur **Excel** permettant un calcul rapide des pertes de charge des grilles colmatées est également disponible en lien avec cette fiche. [Télécharger le tableur](#).

⚠ Il est à noter que le modèle et l'outil Excel fourni ici diffère du modèle utilisé par l'OFB (<https://cassiopee.g-eau.fr/#/list>) dans le cas des grilles colmatées. Pour les grilles propres, les formules sont identiques (formule de Raynal, 2013 et Lemkecher, 2020) entre les deux outils. Le modèle utilisé par le calculateur de l'OFB est développé à partir des thèses de Raynal (2013) et Lemkecher (2020) exclusivement et repose essentiellement sur des études de grilles propres. L'étude actuelle se concentre davantage sur le colmatage et une nouvelle formule est développée.

Quelques notions sont importantes à définir afin d'aborder cette fiche :

- La perte de hauteur d'eau, notée (Δh), correspond à la différence entre la hauteur d'eau en amont et en aval de la grille. Elle est exprimée en mètres [m].
- La perte de charge, notée (ΔH), représente la différence entre la charge (énergie totale d'un fluide en un point donné d'un système) en amont et en aval de la grille. Pour cette application, elle est très similaire à la perte de hauteur d'eau et est également exprimée en mètres [m] de la manière suivante :

$$\Delta H = h_1 - h_2 + \frac{Q^2}{2gB^2} \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right), \text{ avec } h_1 \text{ et } h_2 \text{ les hauteurs d'eau amont et aval de la grille [m], } Q \text{ le débit turbiné [m}^3\text{.s}^{-1}\text{], } B \text{ la largeur du canal [m] et } g \text{ l'accélération de la pesanteur [m.s}^{-2}\text{].}$$

- Le coefficient de perte de charge, noté (ξ), est un coefficient adimensionnel représentant la perte de charge d'un système donné. Il présente l'avantage d'être indépendant de la vitesse d'amenée, ce qui permet de caractériser l'effet d'une grille colmatée par une grandeur fixe, quel que soit l'écoulement. Il est défini comme :

- $\xi = \frac{2g\Delta H}{v_1^2}$, avec v_1 la vitesse débitante (ou la vitesse turbinée) [m.s^{-1}]

2 Explications sur la construction de la formule de prédiction des pertes de charge de grilles colmatées

2.1 Description des essais en laboratoire

Les essais en laboratoire ont été effectués au Laboratoire Pprime, situé à Poitiers, dans un canal à surface libre. Ce projet de thèse fait suite à deux autres travaux de recherche sur le sujet des prises d'eau (Fatma Lemkecher, 2020 et Sylvain Raynal, 2013). Le banc d'essai utilisé est un canal à surface libre de 12 m de long pour 1 m² de section, avec une hauteur d'eau d'environ 70 cm en amont. Pour cette hauteur d'eau, l'écoulement peut atteindre 0,71 m.s⁻¹, ce qui permet de bien représenter l'écoulement dans un canal d'amenée de centrale hydroélectrique. Le canal est conçu à une échelle d'environ 1:4 par rapport à un canal d'amenée standard, et la grille y est représentée à l'échelle 1:2, en respectant les similitudes des nombres de Froude et de Reynolds afin d'assurer des résultats représentatifs.

Une grille inclinée est installée au centre du canal, sur laquelle est positionnée une surface artificielle simulant le colmatage (Figure 1 et Figure 2), soit sur la totalité de la grille, soit sur une partie seulement. Les surfaces artificielles représentant le colmatage ont été sélectionnées (deux plaques perforées, un volume poreux et une surface pleine, Figure 3) afin de reproduire le colmatage naturel tout en permettant des mesures contrôlées. Des mesures des hauteurs d'eau en amont et en aval de la grille colmatée permettent de définir la perte de hauteur d'eau et ainsi d'estimer la perte de charge correspondante (Figure 4). Une description plus complète est disponible dans le manuscrit de thèse, au chapitre 2 (Bon, 2025) et les différentes configurations testées sont résumées au Tableau 1.



Figure 1: exemples de configurations de grilles colmatées testées en laboratoire.

Fiche 1 : Calcul des pertes de charge des grilles inclinées colmatée

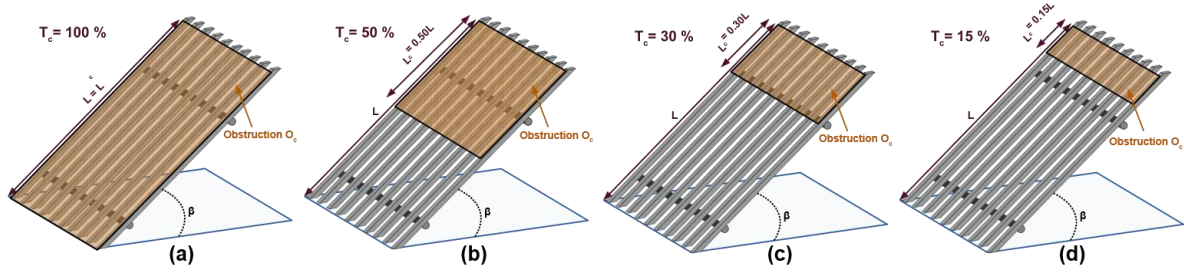


Figure 2: Exemples de positionnement des surfaces de colmatage en laboratoire.

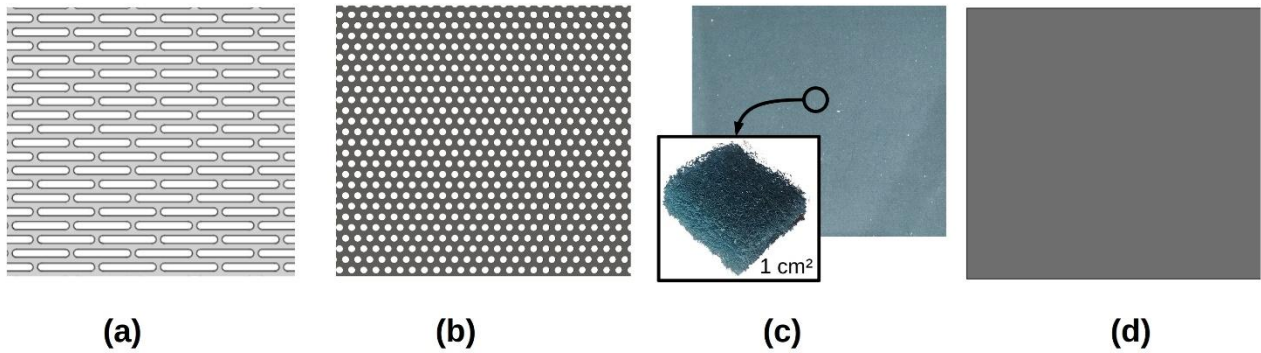


Figure 3: Photographie des différents matériaux de colmatage artificiels sélectionnés.

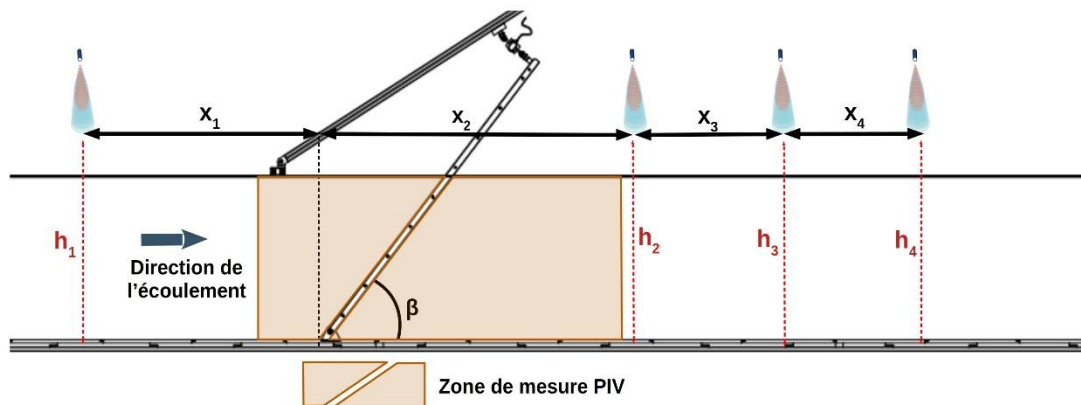


Figure 4: Banc expérimental avec la grille inclinée immergée et les différents capteurs de hauteur d'eau.

Tableau 1: caractéristiques des configurations de grilles colmatées testées en laboratoire.

Paramètres	Valeurs
Angle d'inclinaison (β)	20, 26, 30, 35, 45, 90
Espacement (e)	10, 15, sans grille
Obstruction de colmatage (o_c)	34 %, 57 %, 72-81 %, 100 %
Surface de grille colmatée (T_c)	15 %, 30 %, 50 %, 100 %

Plus de 160 configurations ont été testées, ainsi que quelques configurations mixtes (masque + colmatage) et quelques configurations d'engravement (colmatage par le bas).

2.2 Construction de la formulation

À partir des essais effectués et des pertes de charge mesurées pour chaque configuration de colmatage, une formulation prédictive des pertes de charge a été développée. Cette formulation repose sur une analogie électrique, en considérant que l'écoulement peut être séparé en deux zones : l'une où l'eau passe à travers la partie colmatée de la grille (écoulement ralenti), et l'autre où l'eau s'écoule à travers la partie non obstruée (écoulement accéléré), comme présenté dans l'exemple à la *Figure 5*. L'analogie électrique est représentée à la *Figure 6* se basant sur l'écoulement au travers de la grille partiellement colmatée et permettant de prédire les pertes de charge globales de la grille colmatée.

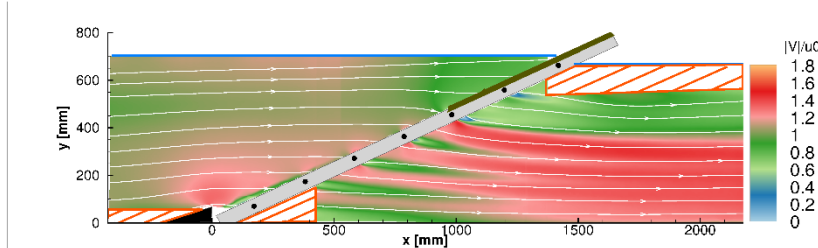


Figure 5: exemple de champ de vitesse observé lors des mesures en laboratoire pour le positionnement du volume poreux sur $T_c = 30\%$ de la surface de la grille.

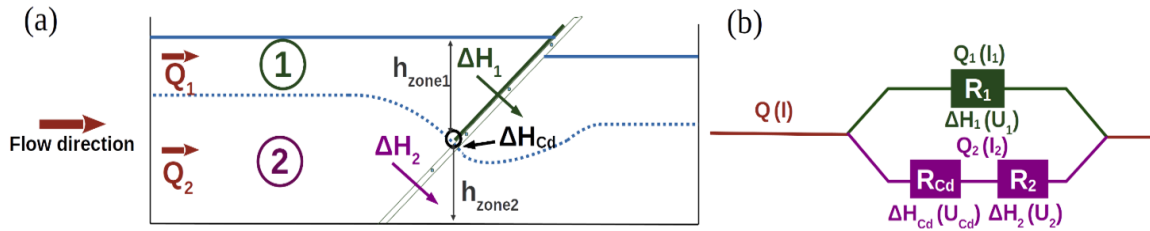


Figure 6: analogie électrique considérée pour la construction de la formule analytique prédictive des pertes de charge.

À partir de l'analogie électrique et de la balance des pertes de charge, le modèle mathématique suivant est obtenu (le calcul complet est fourni dans le chapitre 3 de la thèse) :

$$\xi = \left(\frac{1}{\frac{T_c}{\sqrt{\xi_1}} + \frac{1-T_c}{\sqrt{\xi_{propre} + \xi_{cd}}}} \right)^2,$$

avec ξ_1 représentant le coefficient de perte de charge de la partie colmatée et ξ_{propre} celui de la partie non obstruée, ξ_{cd} le coefficient de perte de charge traduisant la déviation de l'écoulement, ξ le coefficient de perte de charge global et T_c la surface de grille colmatée.

La détermination de chaque coefficient est détaillée dans la thèse en se basant sur les essais en laboratoires, et la formule finale est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \left(\frac{1}{\frac{T_c}{\sqrt{\xi_1}} + \frac{1 - T_c}{\sqrt{\xi_{propre} + \xi_{cd}}}} \right)^2 \\ \xi_1 = \xi_{propre} + 4,7 \left(\frac{1}{1 - o_b} \right)^2 \left(\frac{o_c}{1 - o_c} \right) \sin^2(\beta) \\ \xi_{cd} = 3,04(1 - o_b) T_c^{1,23} o_c^{1,54} (1 + \cos^2(\beta)) \\ \xi_{propre} = K_f \left(\frac{o_b}{1 - o_b} \right)^{1,65} \sin^2(\beta) + K_{ent} \left(\frac{o_{ent}}{1 - o_{ent}} \right)^{0,77} + K_{sp} \left(\frac{o_{sp}}{1 - o_{sp}} \right)^{0,77} \end{array} \right.$$

La première équation provient directement de l'analogie électrique et traduit l'équilibre de l'écoulement entre les différentes zones afin d'assurer une perte de charge globale. Il est possible d'en déduire la grandeur T_c , qui représente la surface de la grille colmatée [%]. Les différents ξ traduisent les coefficients de perte de charge des différentes zones.

ξ_{propre} provient de la formulation de Raynal Sylvain (2013), complétée par Fatma Lemkecher (2020) dans leurs deux thèses. Il se décompose en trois termes :

- Le premier terme correspond à l'effet des barreaux de la grille, avec K_f le coefficient de forme des barreaux [-] et o_b l'obstruction des barreaux [-].
- Le second terme est lié à l'effet des entretoises, avec $o_{ent} = N_{ent} D_{ent} / h_1$, représentant l'obstruction des entretoises [-], et K_{ent} le coefficient de forme des entretoises [-].
- Le dernier terme concerne les supports de la grille, avec $o_{sp} = N_{sp} D_{sp} / h_1$ pour l'obstruction des supports [-] et K_{sp} le coefficient de forme des supports [-].

ξ_1 est le coefficient de perte de charge associé à la zone colmatée de la grille. Il correspond à la somme du coefficient de la grille propre et d'un coefficient supplémentaire lié au colmatage (terme de droite dans la somme). Ce coefficient de colmatage dépend de l'obstruction du colmatage o_c [%] ainsi que de l'angle d'inclinaison β de la grille. L'apparition de l'obstruction de la grille o_b [%] dans ce terme s'explique par le fait que les effets de la surface colmatée et de la grille sont interdépendants. En effet, l'écoulement traversant la zone colmatée est directement influencé par la grille située immédiatement après, et cette interaction est prise en compte à travers un facteur dépendant de o_b .

Enfin, ξ_{cd} traduit l'effet de la déviation de l'écoulement entre les deux zones (colmatée et propre). Il dépend des différentes grandeurs déjà mentionnées, telles que T_c (surface de la grille colmatée), o_c (obstruction due au colmatage) et o_b (obstruction de la grille). Cette formulation a été validée par des essais de terrain (voir chapitre 4 : Bon, 2025), et des simplifications seront apportées par la suite afin d'adapter cette approche aux grilles réelles en fonctionnement.

⚠ Cette formulation permet d'estimer les pertes de charge d'une grille colmatée (sans prise en compte des autres éléments) à partir des résultats obtenus en laboratoire. Il est important de noter que les essais ont été réalisés uniquement sur la grille, sans inclure les exutoires avec ou sans masques, ni les autres éléments de la prise d'eau. Pour une estimation plus précise des pertes de charge globales, il est essentiel de prendre en compte l'ensemble de ces éléments afin d'éviter une sous-estimation.

2.3 Observations sur les dynamiques de colmatage

Cette section est dédiée à quelques observations sur le colmatage issues des essais en laboratoire et des essais de terrain :

- Les pertes de charge augmentent de manière quadratique en fonction des paramètres de perte de charge (o_c et T_c).
 - Le chapitre 3 de la thèse permet de déterminer la limite de perte de charge admissible avant le déclenchement du dégrilleur, en fonction de ces deux paramètres.
 - Un déclenchement du dégrilleur basé à la fois sur la perte de charge et sur son évolution (pente de la courbe de perte de charge) pourrait permettre un meilleur contrôle des phases de fort colmatage. Une pente limite acceptable avant dégrillage pourrait être définie pour optimiser le processus.
- Le colmatage partiel entraîne un écoulement non homogène en aval de la grille, et ce sur plusieurs mètres.
 - Ce phénomène peut poser problème pour les prises d'eau équipées de turbines proches.
 - Un masque positionné en haut de la grille, combiné aux exutoires, peut accentuer cette inhomogénéité en sortie de grille. Bien que l'utilisation d'un masque augmente l'attractivité hydraulique vers les exutoires, elle peut donc générer un écoulement irrégulier.
 - Dans les cas extrêmes, des zones de recirculation en aval de la grille peuvent également être observées en présence de masques ou en cas de colmatage important dans la partie supérieure de la grille.
- En présence de masques entre les exutoires et les bords du canal en haut de grille, des tourbillons d'aspiration peuvent apparaître, entraînant une aspiration d'air à travers la grille (Figure 7).
 - Ce phénomène a été observé, bien que son impact réel n'ait pas été étudié en détail.
 - À long terme, ces tourbillons pourraient détériorer la prise d'eau à cause des vibrations induites.
- Sur le terrain, le positionnement du colmatage sur la grille varie en fonction de plusieurs paramètres :
 - La période de l'année (accumulation de feuilles en début ou en fin de saison).
 - Le régime d'écoulement (débit faible, élevé, crue).
 - Les caractéristiques propres à la centrale (lieu d'implantation, forme de la prise d'eau, etc.).
 - Différents schémas de colmatage ont été observés :
 - ↳ Colmatage par le haut de la grille (le plus fréquent).
 - ↳ Colmatage homogène sur l'ensemble de la grille.
 - ↳ Colmatage par le bas.
 - En laboratoire, le colmatage par le haut a été privilégié.

- Quelques essais de colmatage par le bas ont été réalisés en laboratoire. Des essais avec une même plaque pleine (25 cm) positionnée en haut et en bas de la grille ont été effectués. Ils ont montré l'effet du positionnement du colmatage sur la perte de charge en fonction de l'angle d'inclinaison de la grille (*Figure 8*). Un colmatage en haut de grille fera donc davantage augmenter les pertes de charges qu'un colmatage égale en bas de la grille à cause du perçage de la surface libre. Cette différence reste assez faible.
- Les essais de terrain ont confirmé la prédominance du colmatage par le haut, tout en révélant des cas de colmatage homogène sur la grille.

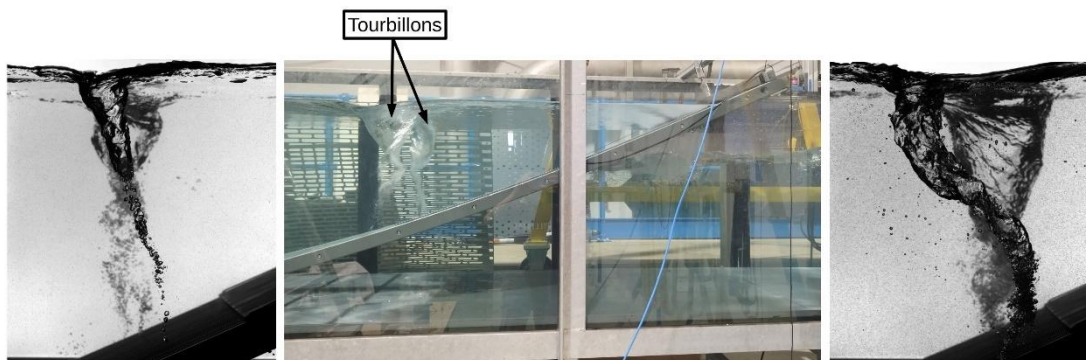


Figure 7: Exemple de tourbillons d'aspirations avec au centre le positionnement des tourbillons (de chaque côté du canal) et sur les côtés des exemples de tourbillons en ombroscopie.

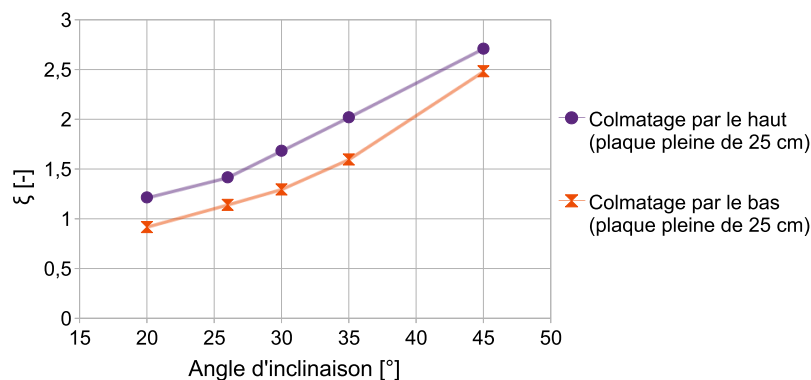


Figure 8: Evolution du coefficient de perte de charge en fonction de l'angle d'inclinaison de la grille avec le positionnement d'une plaque pleine sur 25 cm de la grille dans un premier temps en haut de celle-ci puis dans un second temps en bas.

3 Utilisation de la formule des pertes de charge

L'utilisation de la formule analytique nécessite de connaître le niveau d'obstruction du colmatage accumulé sur la grille. En effet, les grandeurs o_c et T_c doivent être déterminées pour estimer correctement les pertes de charge. Deux méthodes sont présentées ici pour y parvenir. L'application directe de la formule développée en laboratoire aux prises d'eau des centrales en fonctionnement n'est pas toujours possible en raison de certaines différences entre les conditions expérimentales et les configurations réelles (présence d'exutoires en haut de grille, de masques, influence de la prise d'eau sur l'écoulement, etc.). Des adaptations de la loi analytique sont donc proposées dans un second temps en fonction de la configuration à analyser.

3.1 Estimation de l'obstruction de colmatage

3.1.1 Estimation qualitative (visuelle)

La manière la plus simple d'estimer l'obstruction de la grille consiste à photographier le colmatage (si la turbidité de l'eau le permet) et à comparer les images obtenues avec les exemples ci-dessous. La prise de photos peut être réalisée, par exemple, en dehors de l'eau si la visibilité est suffisante, ou en utilisant une GoPro immergée fixée à une tige (comme cela a été effectué lors de la calibration des essais de terrain de la thèse : chapitre 4 ; Bon, 2025). Une fois les photos prises, il est possible de les comparer aux niveaux de colmatage définis dans le Tableau 2.

⚠ Il est important de prendre une photo représentative de toute la surface de la grille et non pas seulement une photo du haut de grille (où le colmatage est le plus important), une définition de l'obstruction par zone étant la meilleure solution. ⚠

Tableau 2: photos permettant de faire le lien entre le colmatage estimé visuellement et le taux d'obstruction.

o_c [%]	Panoramas
26	
35	
45	
61	
74	
90	

3.1.2 Estimation quantitative : traitement d'images

Dans le cadre de la thèse, le calcul de l'obstruction a été effectué par traitement d'images, permettant de reconstruire un panorama à partir d'une vidéo et de calculer l'obstruction de colmatage équivalente

(Figure 9). Cette méthode peut également être reproduite pour permettre un calcul plus précis de l'obstruction.

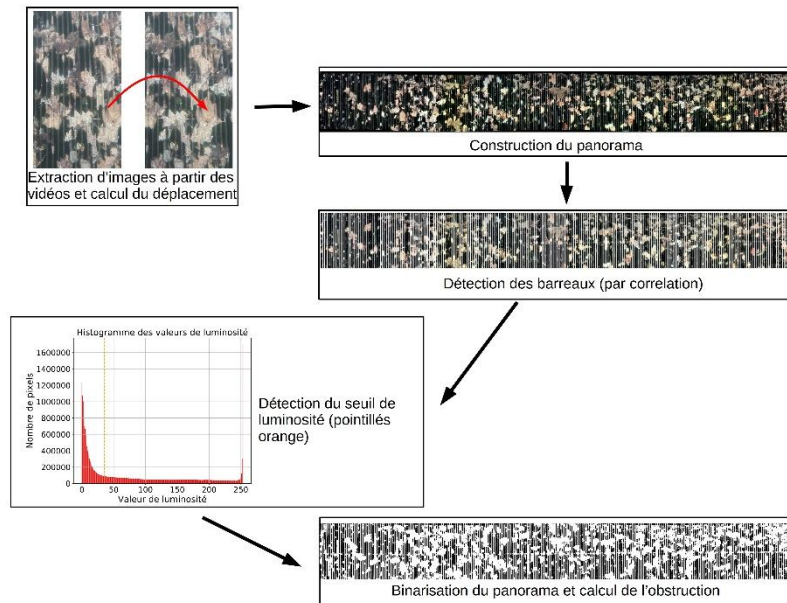


Figure 9 : traitement de l'image complet comprenant la construction d'un panorama, la détection des barreaux et la binarisation par loi de seuil.

L'obstruction de la grille colmatée est alors calculée, et l'obstruction de colmatage o_c peut ensuite être déduite à l'aide de l'expression suivante : $o_c = (o_{tot} - o_b) / (1 - o_b)$ avec o_{tot} l'obstruction totale de la grille et du colmatage [%].

Le calcul complet peut ainsi être effectué et est explicité au Chapitre 4 de la thèse de Bon (2025). Cette approche peut être simplifiée dans le cas où la turbidité de l'eau permet de prendre une image de taille suffisante en une seule photo (Figure 10). Cela permet alors d'éviter la reconstruction d'un panorama et le calcul global en faisant simplement une binarisation par loi de seuil de l'image.

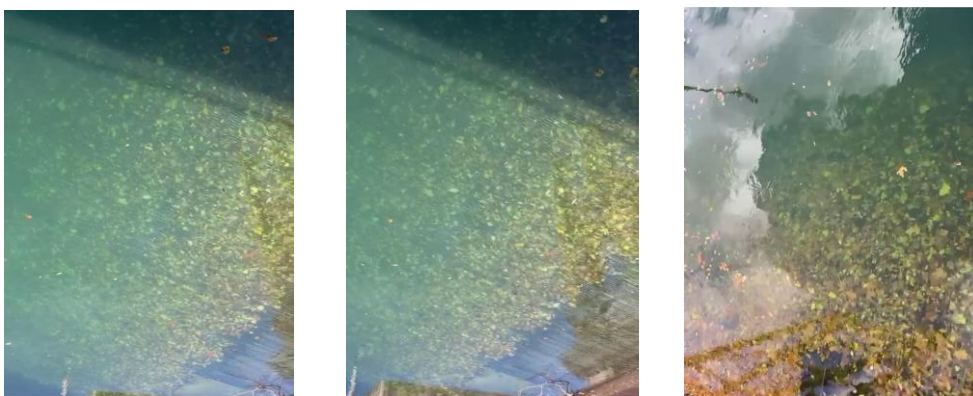


Figure 10: Images de colmatage pris en dehors de l'eau.

Le calcul de la perte de charge des grilles colmatées est ensuite effectué en fonction des configurations de grille. Quatre cas particuliers seront traités ici afin de fournir des exemples de la manière dont la formule analytique peut être utilisée.

Un tableur Excel est mis à disposition pour réaliser les calculs de perte de charge pour les différentes configurations présentées ci-dessous.

3.2 Calcul pour des configurations sans masque de haut de grille

3.2.1 Colmatage homogène

Dans le cas où il n'y a pas de masque en haut de la grille, la formulation peut être utilisée directement. Si le colmatage est suffisamment homogène sur l'ensemble de la grille, une première approche peut être effectuée (*Figure 11*).

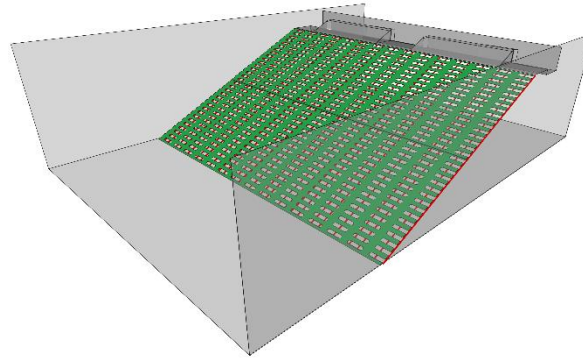


Figure 11 : approche basée sur un colmatage homogène et sans la prise en compte des exutoires et masques de haut de grille.

Seule la grille est alors prise en compte, les exutoires étant considérés comme des éléments extérieurs à la grille. Il est à noter que seule la perte de charge de la grille colmatée est calculée ici, et non celle de la prise d'eau complète, qui comprend également les exutoires. Il sera donc nécessaire d'ajouter, dans un second temps, la perte de charge des autres éléments (par exemple, en utilisant les données de fonctionnement de la grille propre, où la perte de charge de la grille est faible par rapport à celle des autres éléments).

Paramètres :

- o_c : Taux d'obstruction du colmatage, calculé à partir de l'approche précédente.
- T_c : Taux de surface de grille colmatée, dans ce cas de 100 %, car le colmatage est homogène.
- β : Angle d'inclinaison de la grille (souvent 26 degrés).
- o_b : Obstruction de la grille, connue.
- o_{ent} : Obstruction des entretoises, connue.
- o_{sp} : Obstruction des supports, connue.

Remarques :

- Dans cette approche, seule la grille est considérée, sans prendre en compte les exutoires. Le débit à considérer est donc le débit turbiné (Q_{turb}), avec une section correspondant à la largeur du canal (B) et à la hauteur de la grille sans le masque et les exutoires ($h_{grille} = h_1 - h_{masque}$). La vitesse est alors donnée par : v_{turb}/Bh_{grille}
- Dans le fichier Excel de calcul :
 - Aller sur la feuille « sans masque de haut de grille » et remplir les informations demandées (les cases blanches).

- La hauteur correspond à h_{grille} , la vitesse est v_{turb} , et les coefficients de forme (K_F , K_{ent} , K_{sp}) dépendent des formes des barreaux, des entretoises et des supports. Les diamètres des entretoises (D_{ent}) et des supports (D_{sp}) doivent être renseignés (mettre 0 s'ils ne sont pas pris en compte).
- Colmatage : En cas de colmatage homogène, $oc1$ correspond au pourcentage de colmatage, $o_{c2} = 0 \%$ et $T_c = 100 \%$.
- Cas d'une grille propre : Pour simuler une grille propre, il suffit de mettre toutes les valeurs de colmatage (o_{c1} , o_{c2} , T_c) à 0 %.
- Ajout de pertes de charge supplémentaires : Si les pertes de charge des autres éléments sont connues, elles peuvent être ajoutées dans la section « Bonus : calcul de la perte de charge de la prise d'eau

L'équation utilisée est alors la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \left(\frac{1}{\frac{T_c}{\sqrt{\xi_1}} + \frac{1-T_c}{\sqrt{\xi_{propre} + \xi_{cd}}}} \right)^2 \\ \xi_1 = \xi_{propre} + 4,7 \left(\frac{1}{1-o_b} \right)^2 \left(\frac{o_c}{1-o_c} \right) \sin^2(\beta) \\ \xi_{cd} = 3,04(1-o_b)T_c^{1,23}o_c^{1,54}(1+\cos^2(\beta)) \\ \xi_{propre} = K_f \left(\frac{o_b}{1-o_b} \right)^{1,65} \sin^2(\beta) + K_{ent} \left(\frac{o_{ent}}{1-o_{ent}} \right)^{0,77} + K_{sp} \left(\frac{o_{sp}}{1-o_{sp}} \right)^{0,77} \\ \xi_{mes} = \frac{2g\Delta H_{mes}}{v_{turb}^2} \end{array} \right.$$

Exemple :

Le fichier Excel est initialement fourni avec, comme exemple, une prise d'eau d'une largeur B de 7 m et d'une hauteur de grille h_{grille} de 2 m (hauteur d'eau de 2,5 m). La grille est inclinée à 26 degrés, avec une obstruction de 29 %, des barreaux rectangulaires ($K_F = 3,85$), des entretoises circulaires ($K_{ent} = 1,79$) de 30 mm de diamètre, et des supports en forme de U ($K_{sp}=2,66$) de 10 cm de diamètre. Un colmatage avec une obstruction de 50 % sur toute la grille ($T_c=100\%$) est également pris en compte. La perte de charge pour cette configuration est alors de 50 mm.

3.2.2 Colmatage non homogène

Sur le même principe, un colmatage non homogène peut être pris en compte, sans considération des exutoires et des éventuels masques de haut de grille. Dans ce cas, deux zones sont définies : le colmatage supérieur avec un taux d'obstruction o_{c1} et le colmatage inférieur avec un taux d'obstruction o_{c2} . Le taux de surface T_c [%] représente alors la démarcation entre ces deux zones. La Figure 12 illustre la configuration considérée, avec le colmatage supérieur représenté en vert et le colmatage inférieur en bleu.

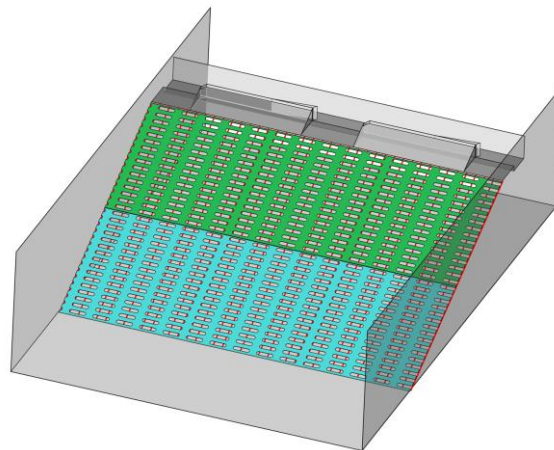


Figure 12 : approche basée sur un colmatage en 2 zones sans prise en compte des exutoires et masques en haut de grille.

Paramètres :

- o_{c1}, o_{c2} : Taux d'obstruction du colmatage des deux zones, calculés à partir de l'approche précédente.
- T_c : Taux de surface de grille colmatée, calculé en fonction de la démarcation du colmatage considéré.
- β : Angle d'inclinaison de la grille (souvent 26 degrés).
- o_b : Obstruction de la grille, connue.
- o_{ent} : Obstruction des entretoises, connue.
- o_{sp} : Obstruction des supports, connue.

Remarques :

- Cette approche suit le même principe que celle du colmatage homogène, sans prise en compte des exutoires et des éventuels masques.
- Pour compléter le fichier Excel :
 - Les informations à fournir sont globalement les mêmes que pour l'approche précédente.
 - Colmatage : Contrairement au colmatage homogène, o_{c2} n'est plus égal à 0 % et T_c n'est plus égal à 100 %.

L'équation prend alors une forme légèrement différente,

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \left(\frac{1}{\frac{T_c}{\sqrt{\xi_1}} + \frac{1-T_c}{\sqrt{\xi_2 + \xi_{cd}}}} \right)^2 \\ \xi_1 = \xi_{propre} + 4,7 \left(\frac{1}{1-o_b} \right)^2 \left(\frac{o_{c1}}{1-o_{c1}} \right) \sin^2(\beta) \\ \xi_1 = \xi_{propre} + 4,7 \left(\frac{1}{1-o_b} \right)^2 \left(\frac{o_{c2}}{1-o_{c2}} \right) \sin^2(\beta) \\ \xi_{cd} = 3,04(1-o_b)T_c^{1,23}o_c^{1,54}(1+\cos^2(\beta)) \\ \xi_{propre} = K_f \left(\frac{o_b}{1-o_b} \right)^{1,65} \sin^2(\beta) + K_{ent} \left(\frac{o_{ent}}{1-o_{ent}} \right)^{0,77} + K_{sp} \left(\frac{o_{sp}}{1-o_{sp}} \right)^{0,77} \end{array} \right. ,$$

$$\xi_{mes} = \frac{2g\Delta H_{mes}}{v_{turb}^2}.$$

Exemple : Le même exemple que pour le colmatage homogène est repris, sans prise en compte du masque de haut de grille, avec en plus $o_{c1} = 50\%$, $o_{c2} = 30$ et $T_c = 50\%$. La perte de charge mesurée est alors de 44 mm.

3.3 Calcul pour des configurations avec masque de haut de grille

3.3.1 Colmatage homogène ou non

Il est également possible de prendre en compte le système de grille, d'exutoires et de masque dans la globalité (Figure 13). Dans ce cas quelques différences doivent être pris en compte par rapport au colmatage homogène : premièrement, le débit considéré est maintenant le débit total débitant (Q) et la hauteur est la hauteur d'eau (h_1) ce qui donne une vitesse débitante considérée (v_1),

$$\xi_{mes} = \frac{2g\Delta H_{mes}}{v_1^2}.$$

De plus, une nouvelle grandeur apparaît représentant le taux de surface masqué par le masque et les exutoires de haut de grille (T_m) [%]. La formulation s'écrit donc de la manière suivante :

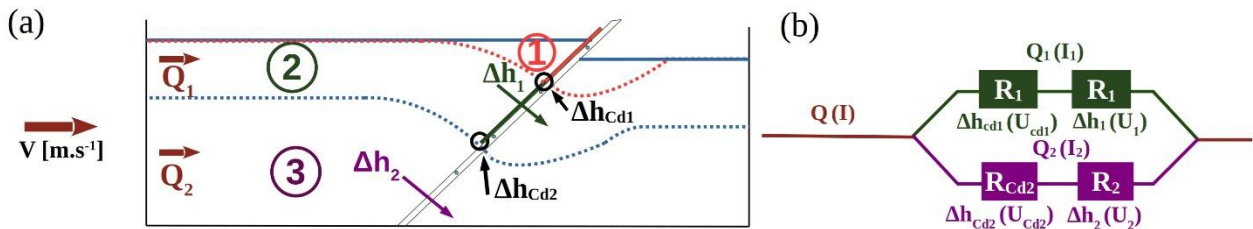


Figure 13: nouvelle analogie électrique pour la prise en compte du masque de haut de grille en plus du colmatage.

La formule devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \left(\frac{1}{\frac{T_c}{\sqrt{\xi_1 + \xi_{cd1}}} + \frac{1 - T_c - T_m}{\sqrt{\xi_{propre} + \xi_{cd2}}}} \right)^2 \\ \xi_1 = \xi_{propre} + 4,7 \left(\frac{1}{1 - o_b} \right)^2 \left(\frac{o_{c1}}{1 - o_{c1}} \right) \sin^2(\beta) \\ \xi_{cd1} = 3,04(1 - o_{tot,2}) T_m^{1,23} (1 + \cos^2(\beta)) \\ \xi_{cd1} = 3,04(1 - o_b) (T_c^{1,23} o_c^{1,54} + 1,7 T_m^{1,23}) (1 + \cos^2(\beta)) \\ \xi_{propre} = K_f \left(\frac{o_b}{1 - o_b} \right)^{1,65} \sin^2(\beta) + K_{ent} \left(\frac{o_{ent}}{1 - o_{ent}} \right)^{0,77} + K_{sp} \left(\frac{o_{sp}}{1 - o_{sp}} \right)^{0,77} \end{array} \right.$$

Colmatage homogène

Le colmatage est dans un premier temps considéré homogène (*Figure 14*).

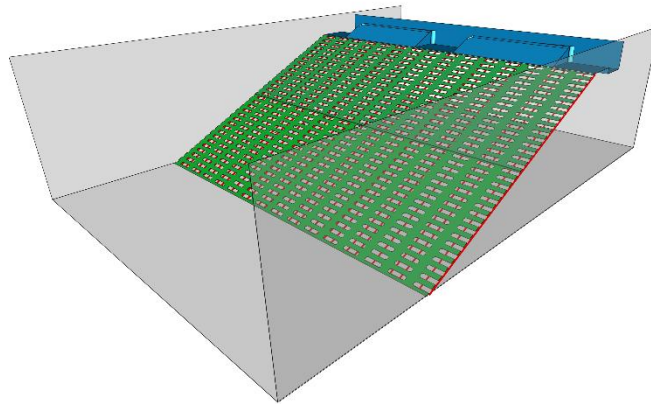


Figure 14: approche homogène avec la prise en compte des exutoires et masques de haut de grille.

Paramètres :

- o_c : Taux d'obstruction du colmatage, calculé à partir de l'approche précédente.
- T_m : Taux de surface de grille masquée, calculé en fonction du masque
 - $(T_m = h_{masque} y_{masque} / (B h_1 - h_{masque} y_{exus}))$, avec h_{masque} la hauteur du masque [m], y_{masque} la largeur du masque [m] et y_{exus} la largeur des exutoires [m].
- T_c : Taux de surface de grille colmatée, calculé en fonction de la démarcation du colmatage considéré et par la longueur totale de la grille et des masques et exutoires ($T_c + T_m = 100\%$).
- β : Angle d'inclinaison de la grille (souvent 26 degrés).
- o_b : Obstruction de la grille, connue.
- o_{ent} : Obstruction des entretoises, connue.
- o_{sp} : Obstruction des supports, connue.

Remarques :

- Attention aux définitions des grandeurs différentes, notamment en prenant en compte le masque.
 - La vitesse utilisée est désormais la vitesse débitante ($v_1 = Q/Bh_1$) et non plus la vitesse turbinée ($v_{turb} = Q_{turb}/Bh_{grille}$).
 - La valeur de T_c correspond à la longueur de la grille colmatée (L_c) divisée par la longueur totale de la grille, comprenant le masque ($L_{grille+exus}$), et non plus par la longueur de la grille seule (L_{grille}). Cela signifie que, dans ce cas, $T_m + T_c = 100 \%$ pour un colmatage homogène.
- Pour compléter le fichier Excel :
 - La feuille Excel "Avec masque de haut de grille" doit être utilisée.
 - Prise d'eau : Le remplissage est similaire aux autres configurations, sauf que la hauteur à renseigner est maintenant la hauteur d'eau (h_1) et la vitesse à prendre en compte est la vitesse débitante (v_1).
 - Colmatage : o_c représente le taux d'obstruction dû au colmatage seul, T_m est le taux de grille obstruée par le masque, et T_c est le taux de grille obstruée par le colmatage (dans le cas d'un colmatage homogène, $T_c = 100 \% - T_m$).

Exemple : Le fichier Excel est initialement fourni avec, comme exemple, une prise d'eau d'une largeur B de 7 m et d'une hauteur de grille h_{grille} de 2 m (hauteur d'eau de 2,5 m). La vitesse débitante est de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$. La grille est inclinée à 26 degrés, avec une obstruction de 29 %, des barreaux rectangulaires ($K_F = 3,85$), des entretoises circulaires ($K_{ent} = 1,79$) de 30 mm de diamètre, et des supports en forme de U ($K_{sp} = 2,66$) de 10 cm de diamètre. Un masque sur 15 % de la grille est considéré et un colmatage avec une obstruction de 50 % sur toute le reste de la grille ($T_c = 85\%$) est également pris en compte. La perte de charge pour cette configuration est alors de 74 mm.

Colmatage non homogène

Finalement, le colmatage peut également être considéré comme non homogène sur la grille, avec le positionnement d'un masque en haut de grille sur une surface T_m , puis d'un colmatage sur une surface T_c , de sorte que $T_m + T_c < 100 \%$ (Figure 15). Dans ce cas, la procédure reste identique.

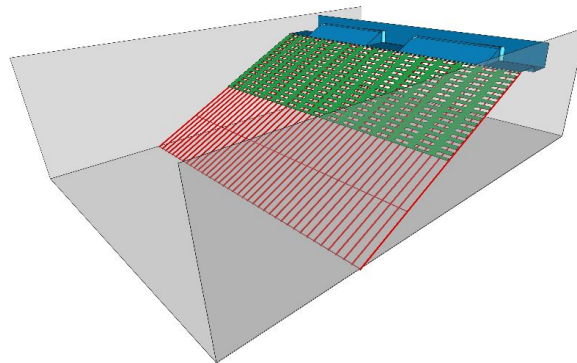


Figure 15: approche de colmatage non homogène avec la prise en compte des masques et exutoires et haut de la grille.

Pour le colmatage non homogène, en tenant compte du masque de la partie supérieure de la grille, seul un colmatage affectant uniquement la partie inférieure (bas de grille) propre a été pris en considération. Il s'agit donc de configurations où le **colmatage** se produit sur **une seule partie de la grille**, et non de situations impliquant deux niveaux de colmatage distincts sur deux zones différentes.

Exemple : Le fichier Excel est initialement fourni avec, comme exemple, une prise d'eau d'une largeur B de 7 m et d'une hauteur de grille h_{grille} de 2 m (hauteur d'eau de 2,5 m). La vitesse débitante est de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$. La grille est inclinée à 26 degrés, avec une obstruction de 29 %, des barreaux rectangulaires ($K_F = 3,85$), des entretoises circulaires ($K_{ent} = 1,79$) de 30 mm de diamètre, et des supports en forme de U ($K_{sp} = 2,66$) de 10 cm de diamètre. Un masque sur 15 % de la grille est considéré et un colmatage avec une obstruction de 50 % ($T_c = 35\%$) est également pris en compte. La perte de charge pour cette configuration est alors de 59 mm.

4 Conclusion

Cette fiche explique et résume les observations sur l'effet du colmatage des grilles inclinées à faible espacement entre les barreaux, issues des essais réalisés en laboratoire et sur le terrain. Elle présente également l'élaboration de la formule analytique. Des exemples d'adaptation de cette formule au colmatage naturel dans des centrales en fonctionnement sont ensuite expliqués, afin de faciliter son utilisation et d'illustrer comment appliquer la loi avec le fichier Excel fourni avec la fiche.

Points importants à retenir :

- ✓ La fiche permet d'estimer la perte de charge d'une grille colmatée dans un objectif de dimensionnement de prise d'eau ou d'étude de l'effet de prises d'eau déjà en fonctionnement.
- ✓ La perte de charge augmente de façon quadratique en fonction des deux paramètres de colmatage o_c et T_c .
- ✓ L'effet du colmatage peut être prédominant sur les pertes de charge comparé à l'effet de la grille seule (un facteur supérieur à 10 entre les deux effets a été observé pour un colmatage intense).
- ✓ Les essais de terrain et les déplacements sur site ont mis en évidence la problématique d'accumulation importante des débris pendant les périodes automnales et certaines périodes spécifiques de fort transport de débris (exemple : fonte des neiges).
- ✓ Un taux d'obstruction limite pour le déclenchement du dégrilleur peut alors être considéré. Plus d'informations à ce sujet sont données dans la thèse de Bon (2025). Ce niveau dépend des centrales.
- ✓ L'effet négatif du masque en haut de la grille sera commenté dans la **Fiche 4** sur l'étude du système d'exutoire. Toutefois, l'ajout d'un simple masque sur la grille augmente significativement les pertes de charge. Des essais avec $o_c = 100\%$ et $T_c = k\%$ peuvent être effectués avec la formule développée ici et à l'aide de l'Excel pour évaluer simplement l'impact d'un masque sur les pertes de charge.

REFERENCES

- 1) Lemkecher, F. « Étude des grilles de prises d'eau ichtyocompatibles ». Theses. Université de Poitiers, déc. 2020. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03255290>.
- 2) Raynal, S. « Étude expérimentale et numérique des grilles ichtyocompatibles ». Thèse de doct. Université de Poitiers, déc. 2013. URL : <http://theses.univ-poitiers.fr>.
- 3) Bon, G. « Etude de colmatage de prises d'eau ichtyocompatibles de centrales hydroélectriques : influences des conditions d'écoulement. » ». Theses. Université de Poitiers, France Hydro Electricité, mars. 2025.

NOTATIONS

Δh	Perte de hauteur d'eau de la grille	m
ΔH	Perte de charge de la grille	m
ΔH_{mes}	Perte de charge de la grille mesurée (laboratoire)	m
ΔH_1	Perte de charge de la partie colmatée de la grille	m
ΔH_2	Perte de charge de la partie propre de la grille	m
ΔH_{Cd}	Perte de charge causée par la déviation de l'écoulement	m
h_1	Hauteur d'eau amont à la grille	m
h_2, h_3, h_4	Hauteurs d'eau aval à la grille	m
Q	Débit dans le canal d'amenée	$m^3.s^{-1}$
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
B	Largeur du canal	m
ξ	Coefficient de perte de charge	-
ξ_{mes}	Coefficient de perte de charge mesuré (laboratoire)	-
ξ_l	Coefficient de perte de charge de la zone colmatée	-
ξ_{propre}	Coefficient de perte de charge de la zone propre	-
ξ_{cd}	Coefficient de perte de charge de la déviation de l'écoulement	-
V_l	Vitesse débitante	$m.s^{-1}$
v_{turb}	Vitesse turbinée	$m.s^{-1}$
T_c	Taux de surface de grille colmatée ($T_c = L_c/L_{imm}$)	-
T_m	Taux de surface de grille masquée ($T_c = L_c/L_{imm}$)	-
o_c, o_{c1}, o_{c2}	Obstructions du colmatage total ou par zones	-
o_b	Obstruction des barreaux	-
o_{ent}	Obstruction des entretoises	-
o_{sp}	Obstruction des supports	-
o_{tot}	Obstruction totale de la grille colmatée	-
L_c	Longueur colmatée de la grille	m
L	Longueur de la grille	m
L_{imm}	Longueur de la grille immergée	m
β	Angle d'inclinaison de la grille	°
e	Espacement entre les barreaux	m
b	Largeur des barreaux	m
p	Profondeur des barreaux	m
N_b	Nombre de barreaux	-
N_{ent}	Nombre d'entretoises	-
N_{sp}	Nombre de supports	-
D_{ent}, D_{sp}	Diamètres (ou largeur) des entretoises et des supports	m
K_f, K_{ent}, K_{sp}	Coefficients de forme des barreaux, entretoises et supports	-
h_{masque}	Hauteur de grille masquée	m
y_{masque}	Largeur de grille masquée	m
y_{exus}	Largeur des exutoires (totale)	m
h_{grille}	Hauteur de la grille (hors exutoires et masque)	m