



NOTE TECHNIQUE SUR LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS DE RESTITUTION DU DEBIT MINIMAL

REFMADI

BARIL D¹ - COURRET D² - FAURE B³

¹ ONEMA DCUAT

² ONEMA - Pôle Ecohydraulique

³ OIEAU

JANVIER 2014

SOMMAIRE

1.	Contexte réglementaire.....	3
2.	Types de dispositifs de restitution du débit minimal	3
2.1.	Echancures ou déversoirs.....	3
2.2.	Orifices et ajutages.....	9
2.3.	Vannes de fond.....	11
2.4.	Modules à masques	12
2.5.	Dispositifs de franchissement piscicole et des embarcations	14
2.5.1.	Dispositifs de franchissement piscicole	14
2.5.2.	Dispositifs pour le franchissement des embarcations.....	15
2.6.	Autres dispositifs : conduite en charge, piquage sur une conduite forcée, turbinage	16
3.	Choix et calage des dispositifs selon les configurations de niveau d'eau amont	17
4.	Gestion du dispositif de restitution du débit minimal	18
4.1.	Entretien	18
4.2.	Contrôle du débit minimal.....	18
4.3.	Moyens de surveillance	21
4.4.	Modulation du débit minimal.....	21
4.5.	Cas particulier des très faibles débits réservés.....	21
5.	Formulation des prescriptions de l'arrêté préfectoral ou du règlement d'eau	21
5.1.	Dispositif de restitution du débit minimal.....	21
5.2.	Dispositif de contrôle du débit minimal.....	22
5.3.	Conformité des dispositifs	22

L'objet de cette note est de guider les maîtres d'ouvrage dans le choix et le dimensionnement des dispositifs de restitution du débit minimal d'une part, et de permettre aux services instructeurs d'évaluer la conformité des dispositifs proposés d'autre part.

1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Les arrêtés d'autorisation ou les décrets de concession des ouvrages de prises d'eau fixent le débit minimal à maintenir à l'aval immédiat de l'ouvrage en cohérence avec l'article L. 214-18 du code de l'Environnement, qui précise que la valeur du débit minimal doit garantir en permanence l'alimentation, la reproduction et la circulation des espèces présentes. Le débit minimal est un débit instantané et doit être garanti en permanence à l'aval immédiat de l'ouvrage, excepté si le débit amont (débit entrant) est inférieur à cette valeur, auquel cas le prélèvement d'eau est suspendu, le débit restitué devant alors être égal au débit entrant (pas de stockage).

Le débit minimal à restituer au Tronçon Court-Circuité (TCC) peut être réparti dans plusieurs dispositifs. Ces dispositifs peuvent être soit des dispositifs spécifiques de restitution du débit minimal, soit des dispositifs de franchissement (exutoire de dévalaison, passe à poissons, passe à canoës kayaks). Le débit minimal peut être modulé en fonction de la saison et avoir donc plusieurs valeurs, nécessitant des dispositifs de restitution modulables permettant le réglage du débit minimal selon la période de l'année. Les dispositifs de restitution du débit minimal sont décrits dans l'arrêté préfectoral d'autorisation ou le règlement d'eau et constituent alors une obligation de moyens.

Le caractère fonctionnel d'un dispositif de restitution du débit minimal est essentiel dans la mesure où le maintien de ce débit à l'aval d'un ouvrage est une obligation permanente et que ce débit a vocation à être contrôlé par les agents commissionnés au titre de la police de l'eau.

Dans cette note, les différents types de dispositifs de restitution du débit minimal sont tout d'abord passés en revue. Le choix et le dimensionnement des dispositifs selon les configurations de niveau d'eau à l'amont de l'ouvrage sont ensuite discutés. Les aspects de gestion des dispositifs (surveillance, entretien, contrôle) sont abordés. Les éléments à prendre en compte lors de la rédaction des actes administratifs sont enfin rappelés.

2. TYPES DE DISPOSITIFS DE RESTITUTION DU DEBIT MINIMAL

Pour les aspects hydrauliques des échancrures, orifices et vannes de fond, cette partie reprend essentiellement les éléments du "*Guide pour le contrôle des débits réglementaires*" (Le Coz et al. 2011). Pour davantage d'informations sur les formules hydrauliques, on peut également se référer à Blevins (1984), IdelCik (1986), Carlier (1986), Bos (1989), Pont-à-Mousson (1989) ou Lencastre (1999).

2.1. Echancrures ou déversoirs

Les échancrures ou déversoirs consistent en des ouvertures permettant un déversement à surface libre. Elles sont le plus souvent aménagées directement sur la crête des seuils ou des barrages, ou dans les bajoyers de la prise d'eau (Figure 1). Les échancrures sont généralement rectangulaires. Pour une meilleure précision, notamment dans le cas de petites valeurs de débit à restituer, on peut adopter une forme triangulaire.

Les échancrures s'avèrent en effet sensibles aux variations de niveau d'eau amont ; elles sont donc préconisées lorsque celui-ci est précisément régulé, ou lorsque que les variations sont faibles (< 0.05 m). Pour ne pas exacerber cette sensibilité, lors de la définition de la géométrie de l'échancrure, on privilégiera la hauteur de charge sur la crête de déversement, plutôt que la largeur de l'échancrure. On privilégiera d'autre part un déversement clairement dénoyé, avec un niveau aval bien en-deçà de la cote de l'échancrure, de façon que sa débitance ne dépende pas du niveau aval (tant qu'il ne transite que le débit réservé dans le TCC).

Deux catégories de déversoir se distinguent selon le rapport entre la hauteur de charge h sur la crête et l'épaisseur de la crête e . Le déversoir est dit mince lorsque $h > 2 * e$ et épais lorsque $h < 1.5 * e$ (zone de transition dans la gamme $1.5 * e < h < 2 * e$). Les deux catégories de déversoir se différencient en termes de coefficient de débit et de sensibilité à l'enneigement par l'aval.



Figure 1 : Exemple de déversoir rectangulaire dénoyé.

La Figure 2 présente les formules pour le calcul du débit transitant par des déversoirs rectangulaires et triangulaires en mince paroi dénoyés avec **Q** le débit sur le déversoir (m^3/s), **C** le coefficient de débit [-], **b** la largeur du déversoir ou de l'échancrure (m), **h** la hauteur d'eau ou charge sur la crête de l'échancrure (m), α le demi angle au sommet d'une échancrure triangulaire, **B** la largeur du chenal d'écoulement à l'amont et **p** la hauteur de pelle au pied de l'échancrure, en amont (m).

Le coefficient de débit **C** est fonction des décollements de l'écoulement au niveau des bords et de la crête du déversoir (fonction des rapports h/p et b/B). La Figure 3 présente l'abaque pour la détermination du terme correctif **Cr** qui rend compte de l'importance des décollements sur les bords. Selon la formule, le coefficient de débit **C** peut varier de 0.40 à 0.525 ($h/p = 2.5$ et $b/B = 1$). En pratique, il est généralement voisin de 0.4, la largeur de l'échancrure étant petite par rapport à celle du seuil ou du bajoyer.

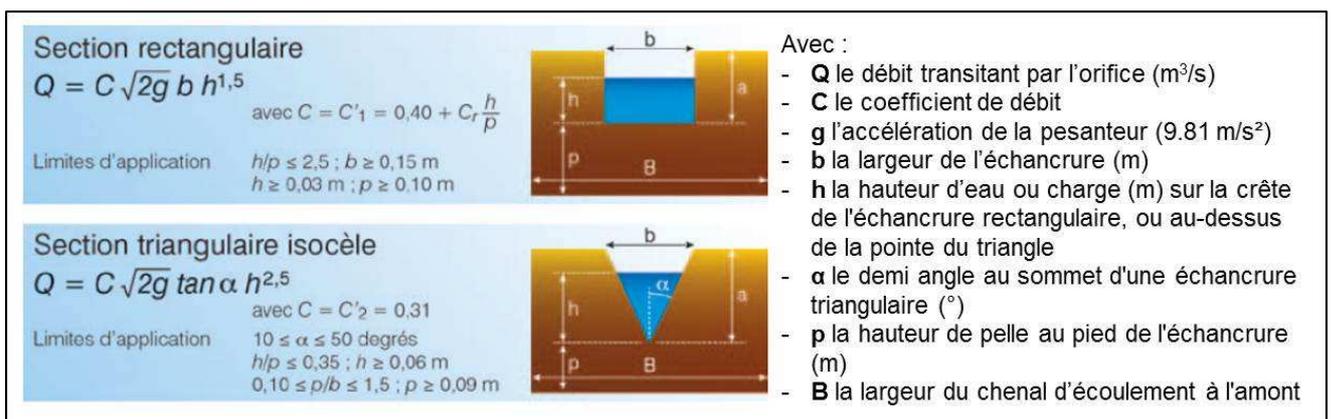


Figure 2 : Formules pour le calcul du débit transitant par des déversoirs rectangulaire et triangulaire en mince paroi dénoyés (figure extraite de Le Coz et al. 2011).

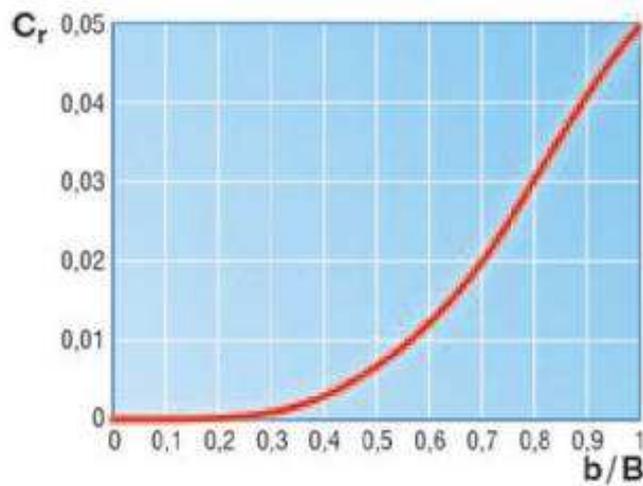


Figure 3 : Abaque pour la détermination du coefficient C_r pour un déversoir rectangulaire en mince paroi (figure extraite de Le Coz et al. 2011).

Les Figure 4 et Figure 5 présentent les débits transitant par une échancrure rectangulaire et triangulaire respectivement, en fonction de la hauteur d'eau h et pour différentes largeurs d'échancrures b ou différents demi-angles au sommet α .

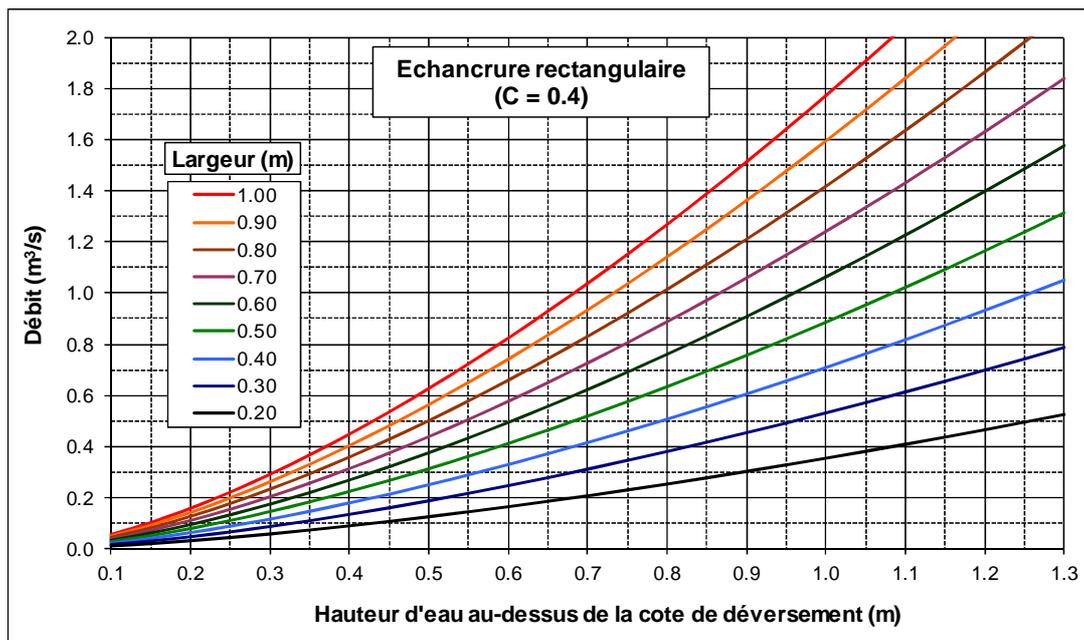


Figure 4 : Débit transitant par une échancrure rectangulaire dénoyée en fonction de la hauteur d'eau h au-dessus de la cote de déversement pour différentes largeurs d'échancrure b .

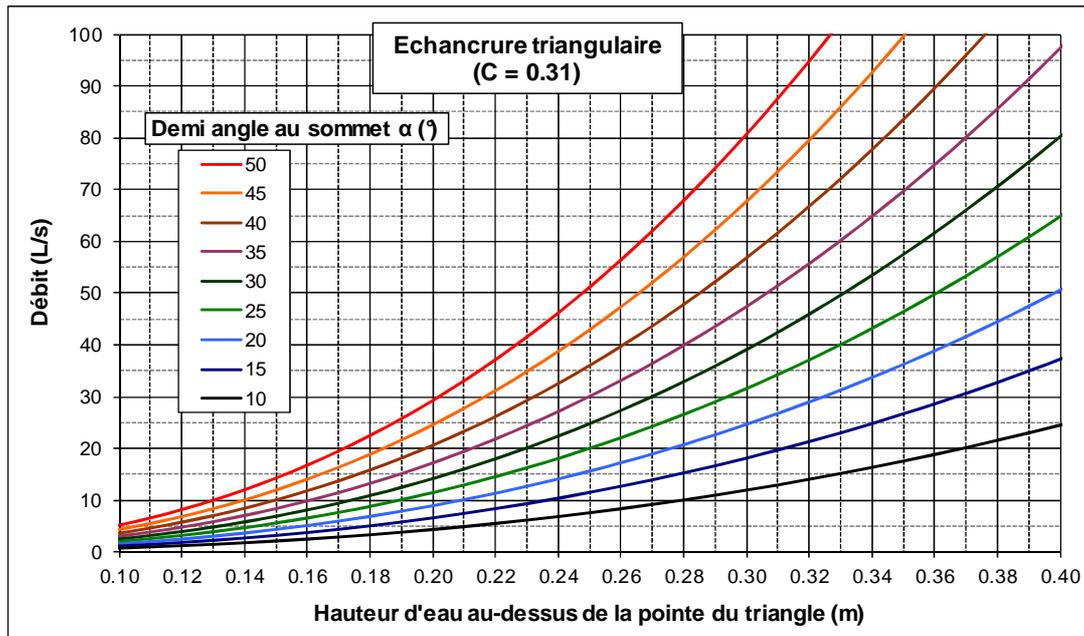


Figure 5 : Débit transitant par une échancrure triangulaire dénoyée en fonction de la hauteur d'eau h au-dessus de la pointe du triangle et pour différents demi-angles au sommet α .

Dans le cas des déversoirs épais, seule la forme rectangulaire s'avère effectivement employée pour la restitution d'un débit minimal. La formule pour le calcul du débit est fondamentalement la même que pour les déversoirs minces. Le coefficient de débit C est alors fonction non seulement des décollements de l'écoulement en entrée du déversoir, mais également du profil longitudinal de la crête. La Figure 6 présente les expressions du coefficient de débit C pour un déversoir avec un profil longitudinal rectangulaire (arêtes vives) et un profil arrondi à l'amont. Le coefficient de débit C peut ainsi varier entre environ 0.33 et 0.48 pour un déversoir avec un profil longitudinal rectangulaire et entre 0.36 et 0.53 pour un déversoir avec un profil longitudinal arrondi à l'amont.

Les déversoirs minces, plus précis, sont préférables dans le cas de petites valeurs de débit à restituer. Les déversoirs épais sont plutôt utilisés pour les débits importants. Quel que soit le type de déversoirs, une attention particulière doit être portée à la détermination du coefficient de débit. Au-delà des paramètres pris en compte dans les formules présentées, la courantologie à l'amont de l'échancrure peut également influencer le coefficient de débit. En particulier, si l'écoulement à l'approche de l'échancrure est oblique, cela peut exacerber le décollement de l'écoulement sur un des bords de l'échancrure et engendrer une diminution du coefficient de débit. Cette configuration peut notamment se produire au niveau d'une échancrure ouverte dans le bajoyer latéral d'un canal d'amenée. De plus, la largeur b du déversoir est à considérer perpendiculairement à l'écoulement déversant, ce qui en rend délicat et incertain le dimensionnement dans le cas d'un écoulement d'approche oblique.

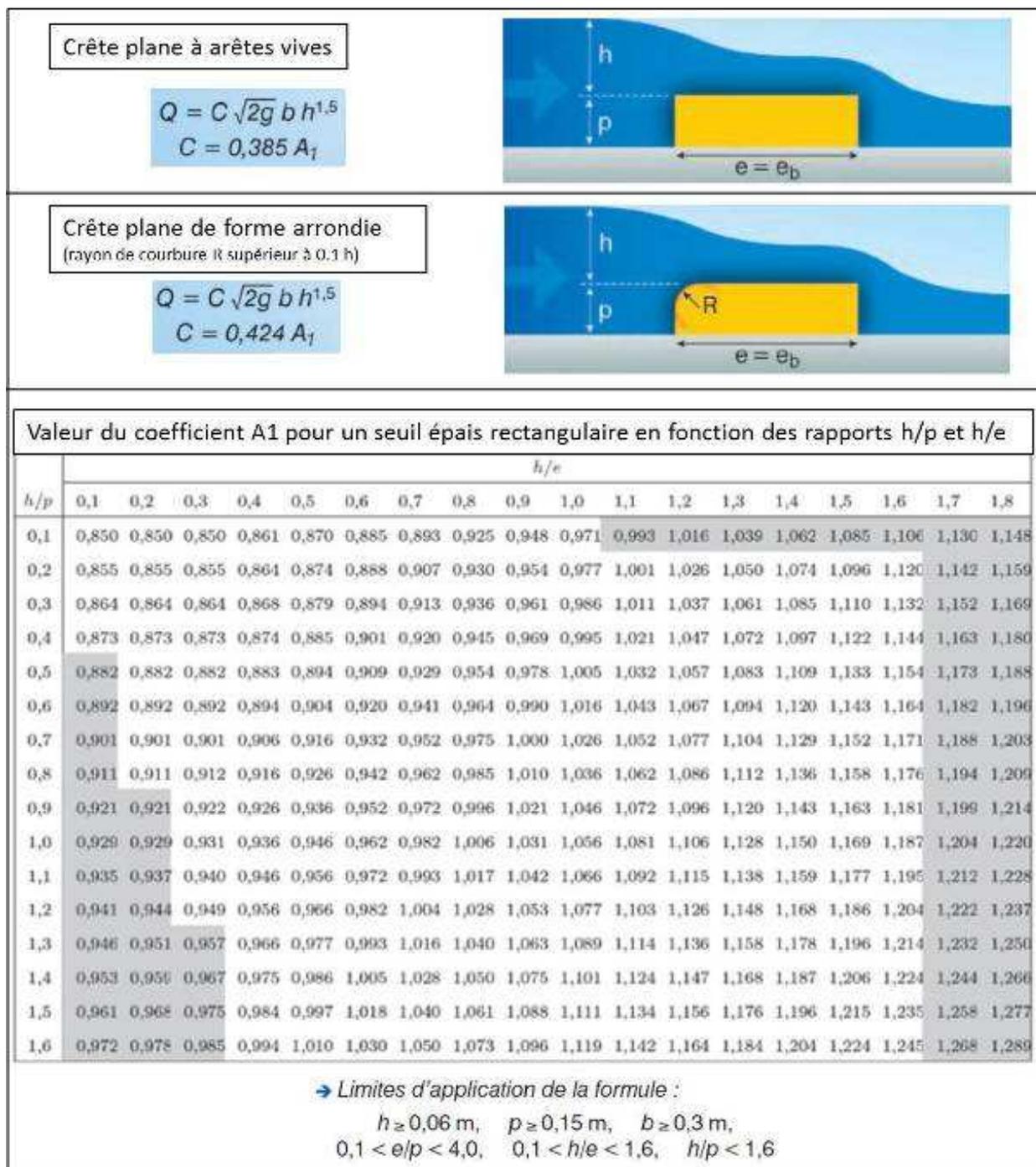


Figure 6 : Expressions du coefficient de débit **C** selon le profil longitudinal d'un déversoir épais rectangulaire dénoyé et des rapports **h/p** et **h/e** (sans contraction latérale ; figure adaptée de Le Coz et al. 2011).

La Figure 7 présente une comparaison de l'évolution du débit transitant par 2 échancrures rectangulaires de 0.5 et 1.0 m de largeur, en fonction de la charge sur la crête (coefficient de débit égal à 0.4). A titre d'exemple, on peut observer qu'un débit de 0.5 m³/s peut transiter soit par l'échancrure de 0.5 m de largeur avec une charge de 0.68 m, soit par l'échancrure de 1.0 m de largeur avec une charge de 0.43 m. Les deux échancrures ne vont par contre pas réagir de la même façon aux variations de niveau d'eau amont. Par exemple, des abaisssements de 5 et 10 cm du niveau amont se traduiront respectivement par des débits de 0.42 et 0.34 m³/s pour l'échancrure de 1.0 m de large, soit des diminutions de 16% et 32%. Pour l'échancrure de 0.5 m de large, ces mêmes abaisssements se traduiront respectivement par des débits de 0.44 et 0.39 m³/s, soit des diminutions de 12% et 22%. Des élévations similaires du niveau d'eau amont se traduiront par des augmentations de débit comparables, quelque peu supérieures aux diminutions.

La Figure 8 présente de même les variations de débit suite à des variations de niveau d'eau de +/- 3 cm, pour des échantures triangulaires dénoyées avec des demi-angles au sommet de 25° et 50° calées pour un débit de 40 L/s.

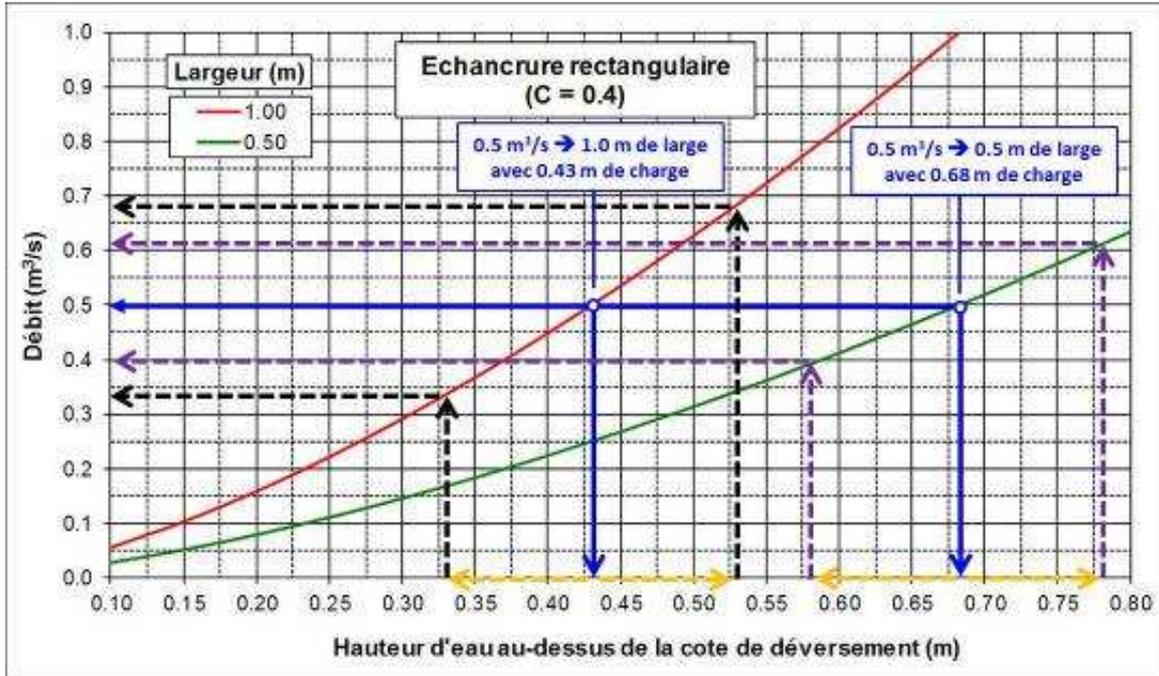


Figure 7 : Illustration des variations de débit suite à des variations de niveau d'eau de +/- 10 cm, pour des échantures rectangulaires dénoyées de 0.5 m et 1.0 m de large, calées pour 0.5 m³/s.

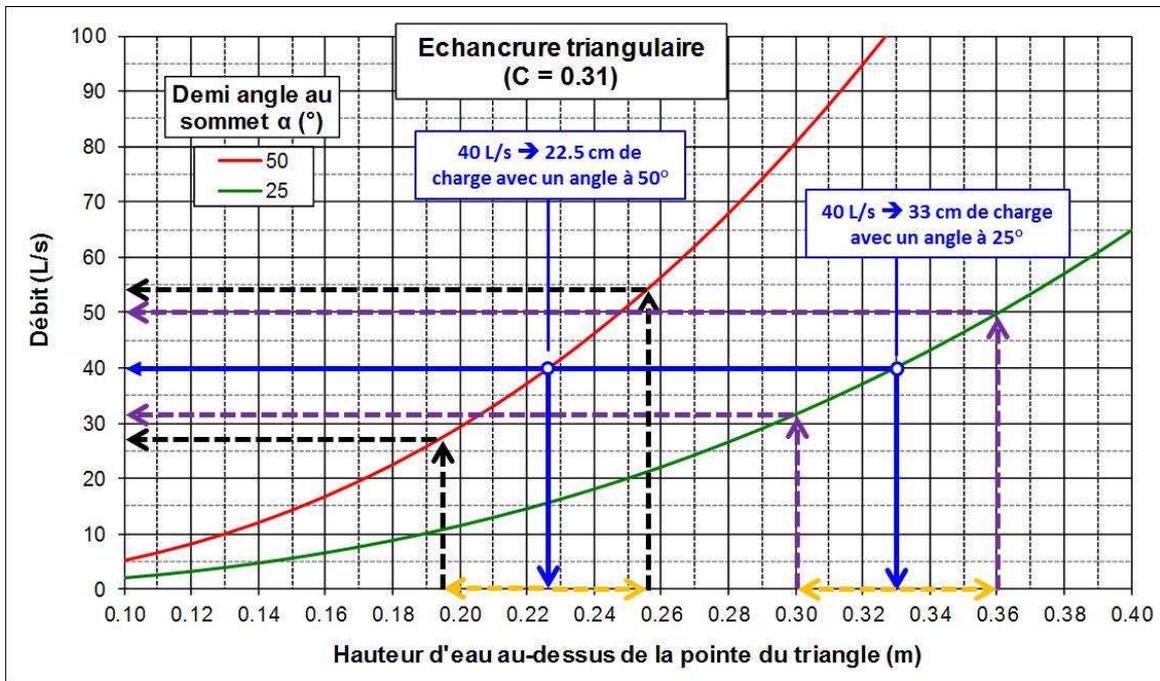


Figure 8 : Illustration des variations de débit suite à des variations de niveau d'eau de +/- 3 cm, pour des échantures triangulaires dénoyées avec des demi-angles au sommet de 25° et 50°, calées pour 40 L/s.

2.2. Orifices et ajutages

Les orifices ou ajutages consistent en des ouvertures complètement noyées à l'amont au travers desquelles l'eau s'écoule (Figure 9). On parle d'orifices lorsque que l'ouverture est aménagée dans une paroi mince et que la veine liquide n'est en contact qu'avec le bord intérieur (sans recoller au bord extérieur). On parle d'ajutages pour des ouvertures dont les parois sont prolongées sur une distance de 2-3 fois la longueur caractéristique de l'ouverture (diamètre, coté), ou bien une ouverture aménagée dans une paroi épaisse. Le prolongement par un ajutage peut être intérieur (rentrant), extérieur (sortant), ou les deux (Figure 10). Une paroi épaisse s'apparente à un ajutage extérieur. Les orifices ou ajutages sont le plus souvent aménagés dans des éléments du barrage de faible épaisseur, en particulier dans des vannes. Ils sont généralement circulaires, parfois carrés ou rectangulaires.



Figure 9 : Exemple d'orifice à forte charge dénoyé à l'aval.

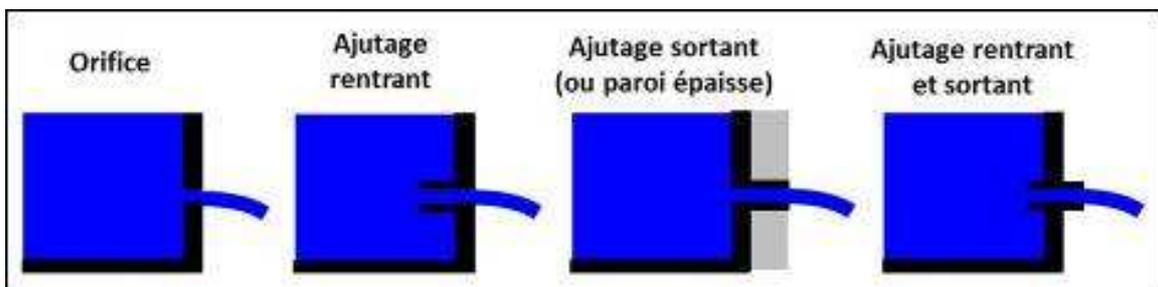


Figure 10 : Illustration des orifices et ajutages.

Les orifices sont moins sensibles aux variations du niveau d'eau amont que les échancrures. Lors de l'implantation d'un orifice, on privilégiera la possibilité d'avoir une hauteur de charge importante pour minimiser l'effet des variations du niveau d'eau amont tout en conservant un diamètre suffisant de l'orifice pour limiter les risques d'obstruction par des débris végétaux. Il est également recommandé d'éloigner le bord inférieur de l'orifice du fond de façon à limiter les risques d'obstruction par des sédiments.

Un orifice peut être dénoyé ou noyé par l'aval. Néanmoins, pour que sa débitance ne dépende pas du niveau aval, une configuration dénoyée sera privilégiée (tant qu'il ne transite que le débit minimal dans le TCC). La Figure 11 présente la formule pour le calcul du débit transitant par un orifice dénoyé. Cette formule est applicable tant que :

- la vitesse d'approche dans le chenal amont est négligeable,
- la surface de la section mouillée à l'amont est au moins égale à 10 fois la surface de l'orifice S_o ,
- et la hauteur d'eau (ou charge) à l'amont au-dessus du centre de l'orifice est supérieure au diamètre de l'orifice, soit $h \geq 1.5 w$ et $w \geq 0.02$ m.



Figure 11 : Formule pour le calcul du débit transitant par un orifice dénoyé (figure adaptée de Le Coz et al. 2011).

Pour un orifice, la valeur du coefficient de débit C est fonction des phénomènes de décollement de l'écoulement en entrée, de la taille de l'orifice et de la charge. Les influences de la taille de l'orifice et de la charge sur la valeur du coefficient de débit sont toutefois très faibles. Pour des orifices à arêtes vives (contraction complète de l'écoulement¹), une valeur de 0.60 est ainsi généralement adoptée. Si les décollements sont supprimés sur tout ou partie du périmètre de l'orifice (contraction incomplète de l'écoulement), soit parce que les arêtes de l'orifice sont plus ou moins profilées, soit parce que l'orifice est proche ou attenant à une paroi (bajoyer ou fond), le coefficient de débit est alors augmenté. De même, un ajutage va influencer sur le coefficient de débit, en le réduisant ou en l'augmentant selon sa configuration (rentrant ou sortant, à arêtes vives ou profilées). Le coefficient de débit peut ainsi varier de 0.5 pour un ajutage rentrant court à arête vives, à plus de 0.95 pour un ajutage sortant à "veine moulée".

C'est pourquoi une attention particulière devra être portée dans le choix de la forme de l'orifice ou de l'ajutage, ainsi que dans son positionnement, de manière à pouvoir déterminer précisément le coefficient de débit. Pour ce faire, on peut en particulier se référer à Carlier (1986) ou Lencastre (1999), dont certaines indications sont reportées dans le Tableau 1. Il est recommandé d'aménager des dispositifs simples, avec des arêtes vives, pour lesquels il y a le moins d'incertitudes sur la valeur du coefficient de débit.

Dans le cas particulier des orifices de fond aménagés dans les cloisons des passes à bassins, le coefficient de débit utilisé est de l'ordre de 0.72 pour tenir compte des suppressions de décollement sur un bord et sur le fond.

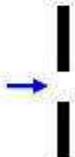
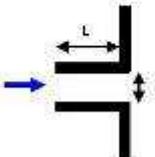
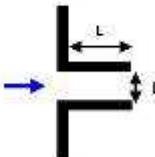
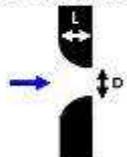
Orifice avec contraction complète (arêtes vives)	Ajutage rentrant ($2D < L < 3D$)	Ajutage sortant ($2D < L < 3D$)	Ajutage à arêtes profilées ($L = 0.625D$; rayon de courbure égal à $1.625D$)
$C = 0.6$	$C = 0.51$	$C \approx 0.80$	$C = 0.96 - 0.99$
			

Tableau 1 : Coefficients de débit pour les orifices et ajutages dénoyés indiqués par Lencastre (1999).

¹ Contraction complète de l'écoulement : les décollements se produisent sur tout le périmètre de l'orifice.

La Figure 12 présente le débit transitant par un orifice dénoyé à l'aval en fonction de la charge sur le centre de l'orifice h et pour différentes surfaces d'orifice S_o . Un débit de 100 L/s peut par exemple transiter par un orifice de 300 cm² sous 1.6 m de charge. Des réductions ou augmentations de charge de 5 et 10 cm n'entraînent alors que des réductions limitées respectivement d'environ ± 1 L et ± 2.5 L/s.

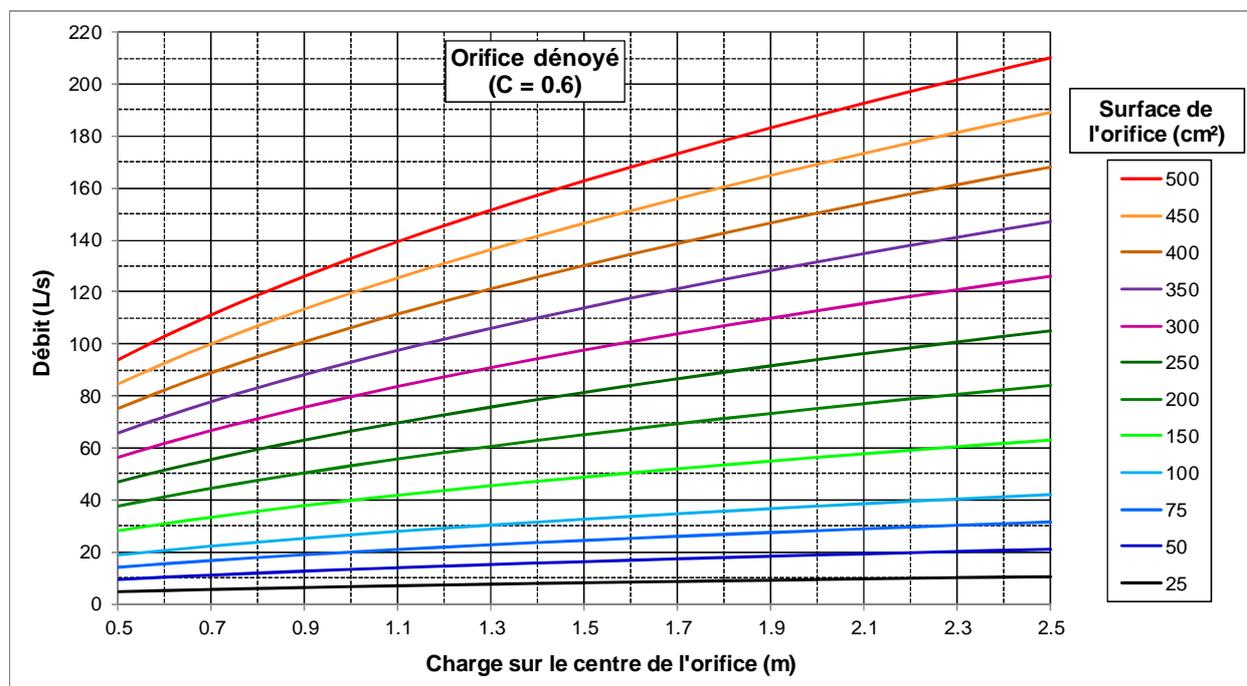


Figure 12 : Débit transitant par un orifice dénoyé à l'aval en fonction de la charge sur le centre de l'orifice et pour différentes surfaces d'orifice.

2.3. Vannes de fond

Les vannes de fond équipent de nombreux barrage et sont régulièrement utilisées comme dispositif de restitution de tout ou partie du débit minimal. Ce sont généralement des vannes plates verticales (vanne guillotine ; Figure 14). Sur les aménagements de taille moyenne à grande, on peut également rencontrer des vannes secteurs (ou segment).

Le débit transitant par une vanne de fond peut être évalué par la même formule que pour les orifices (Figure 13), en prenant comme surface S_o le produit de la largeur de la vanne b et de hauteur d'ouverture w (Figure 13). La charge est alors considérée égale à la hauteur d'eau au-dessus du radier de la vanne h . La formule est applicable tant que $h' < 0.6 w$ (déversement libre à l'aval), $h \geq 2 w$, $w \geq 0.02$ m et $h \geq 0.015$ m.

Pour les vannes plates verticales, le coefficient de débit varie entre 0.5 et 0.6 en fonction du rapport entre la charge et l'ouverture de la vanne (h/w). Pour les vannes segments, le coefficient de débit va de plus dépendre de l'inclinaison de l'extrémité du segment, qui varie selon son ouverture. Au niveau des vannes, les décollements sont généralement supprimés au fond, la forme du fond à l'amont et à l'aval de la vanne pouvant influencer sur la valeur du coefficient (l'idéal étant un fond plan et horizontal). Les décollements sont également souvent supprimés sur 1 ou 2 côtés quand la vanne est attenante à des bajoyers latéraux. Pour la détermination du coefficient de débit, on peut en particulier se référer à Lencastre (1999).

Le rapport entre la hauteur d'ouverture w et la largeur b des vannes de fond étant généralement faible, la précision du réglage de l'ouverture de la vanne est alors prépondérante pour pouvoir restituer précisément le débit. Comme pour les dispositifs précédents, on privilégiera une configuration dénoyée pour que la débitance de la vanne ne dépende pas du niveau aval (tant qu'il ne transite que le débit réservé dans le TCC).

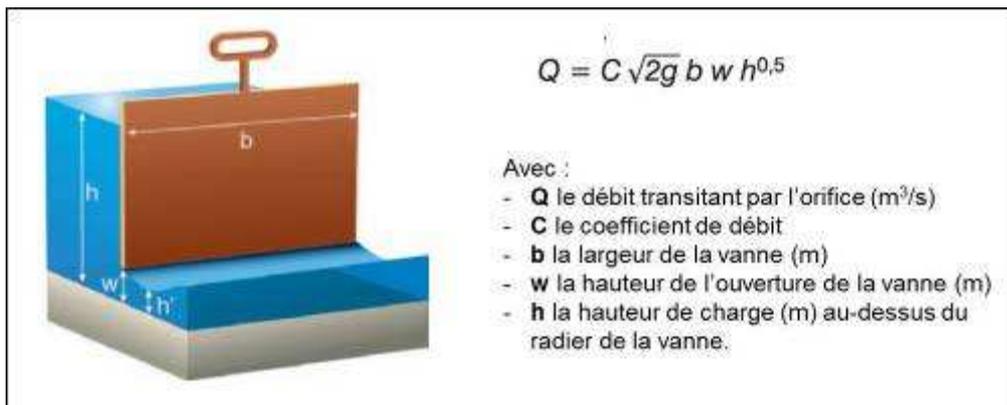


Figure 13 : Formule pour le calcul du débit transitant par une vanne de fond (figure extraite de Le Coz et al. 2011).



Figure 14 : Exemple d'écoulement sous une vanne de fond

2.4. Modules à masques

Les modules à masques, anciennement modules Neyrpic, sont des dispositifs à présent commercialisés par la société Hydrostec². Ces modules associent un déversoir profilé avec 1 ou 2 masques placés au-dessus pour corriger l'effet des variations du niveau d'eau amont sur le débit (Figure 15). L'objectif de ces dispositifs est d'obtenir une quasi-régulation du débit avec un système complétement statique.

Tant que le niveau d'eau amont est en-deçà du masque, le débit s'écoule à surface libre sur le seuil ; le dispositif fonctionne comme un déversoir. Lorsque le niveau d'eau amont monte et « accroche » le premier masque, l'écoulement se fait en charge avec une contraction importante de l'écoulement et un coefficient de débit qui diminue brusquement (transition vers un fonctionnement d'orifice noyé). Le coefficient de débit diminue encore au fur et à mesure que la charge augmente, ce qui permet d'en contrebalancer la tendance à augmenter du débit (Figure 16 en haut).

Certains modules présentent un second masque situé à l'aval du premier. Grâce à la contraction induite par le premier, ce deuxième masque est positionné plus près du seuil pour former un orifice plus réduit. Lorsque le niveau d'eau amont dépasse une certaine cote, le premier masque est noyé et le second entre alors en action, contrebalançant de nouveau la tendance à augmenter du débit (Figure 16, en bas). Pour davantage d'explications, se référer notamment à Bos (1989).

² <http://www.hydrostec.com.br/>

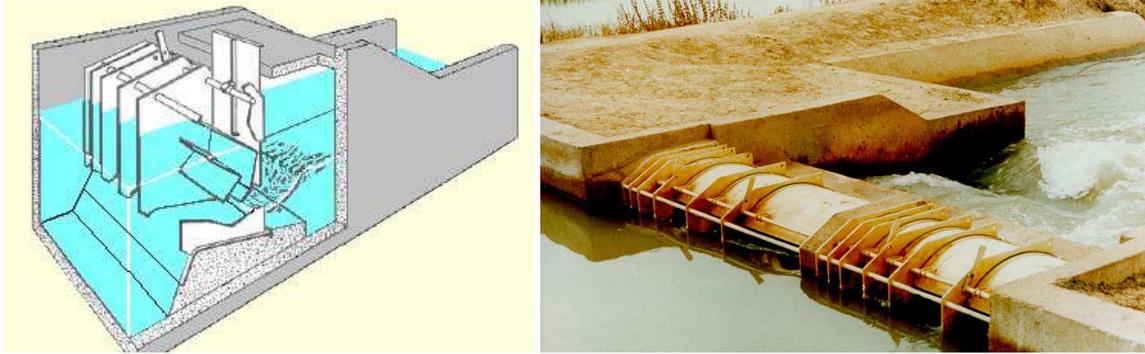


Figure 15 : Illustration des modules à masque (extrait de la brochure Hydrostec).

Les modules à masques sont principalement utilisés dans les réseaux d'irrigation. Ils se présentent sous forme d'ensemble métallique monobloc. La société propose différentes séries de modules, avec pour chacune plusieurs largeurs, couvrant ainsi une large gamme de débit allant de 5 L/s à 1 m³/s. La combinaison de plusieurs modules permet d'atteindre le débit souhaité. Les modules incluent des vannes permettant de les obturer.

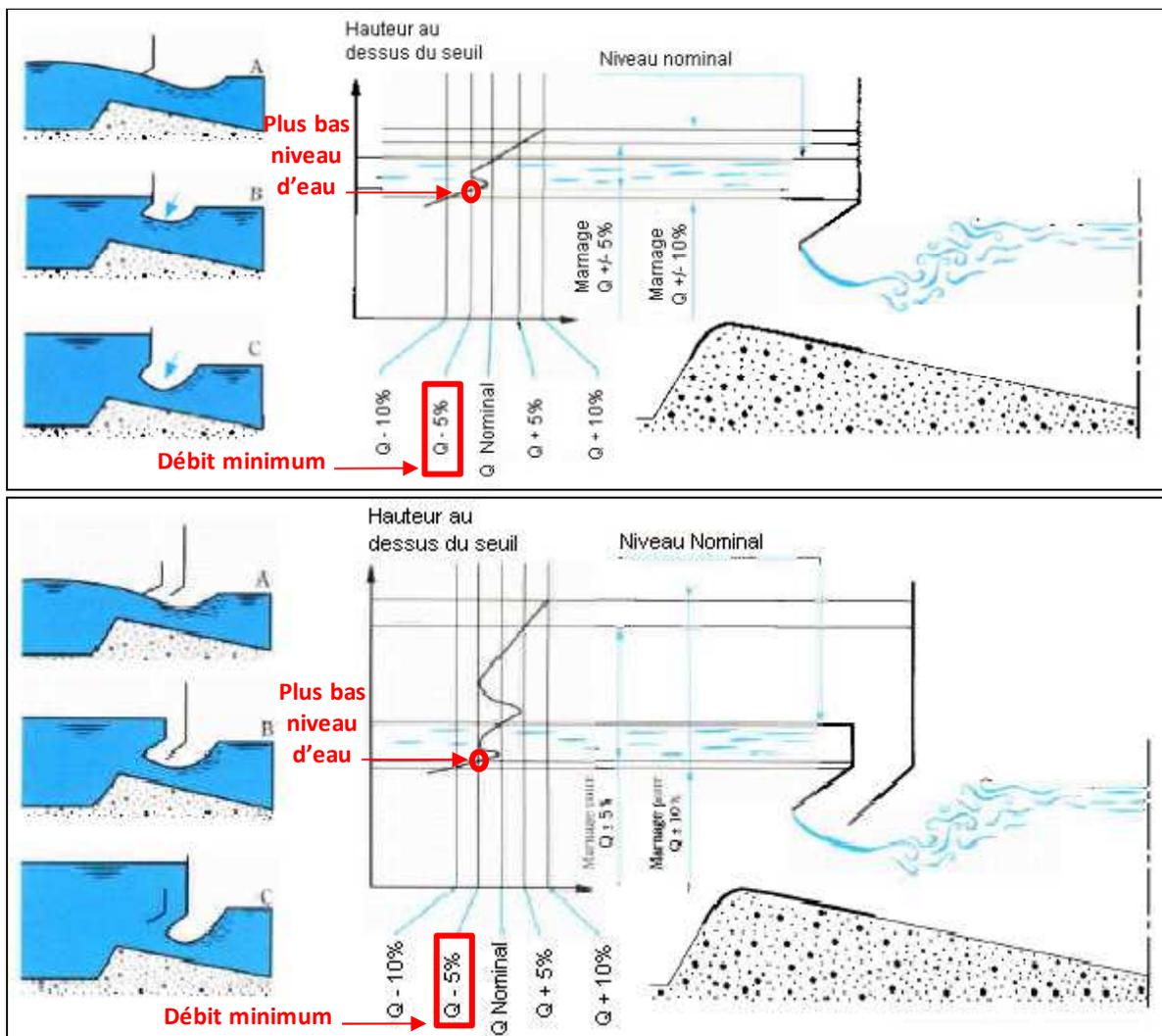


Figure 16 : Schéma de principe et courbe de fonctionnement d'un module à 1 masque (en haut) et à 2 masques (en bas) (extrait de la brochure Hydrostec). Le point de fonctionnement préconisé pour le plus bas niveau d'eau amont est indiqué en rouge.

Pour la restitution d'un débit réservé, par rapport aux courbes de fonctionnement [niveau-amont - débit] illustrées en Figure 16, on aura intérêt à dimensionner les modules en considérant que le débit réservé correspond à $Q - 5\%$, et à les caler en altitude pour que le plus bas niveau d'eau amont corresponde au premier point de fonctionnement à $Q - 5\%$. De cette façon, les modules à 2 masques permettent par exemple de limiter l'augmentation du débit à environ $+10\%$ pour une augmentation du niveau amont de 14.5 cm pour le modèle X_2 (modules de 5 L/s à 20 L/s), de 23 cm pour le modèle XX_2 (modules de 10 L/s à 90 L/s), de 43 cm pour le modèle L_2 (modules de 50 L/s à 400 L/s) et de 68 cm pour le modèle C_2 (modules de 100 L/s à 1000 L/s). A titre de comparaison, des performances similaires de régulation du débit sont atteintes par des orifices positionnés respectivement à des profondeurs d'environ 0.70 m, 1.10 m, 2.05 m et 3.25 m.

De manière générale, ces dispositifs sont donc moins sensibles aux variations du niveau d'eau amont que les échancrures, mais restent plutôt plus sensibles que des orifices placés en profondeur. Pour la restitution de débit réservé, les modules à masques peuvent donc s'avérer intéressants dans les cas où le niveau d'eau amont n'est pas régulé et où la profondeur de la prise d'eau est faible. Ces dispositifs vont par contre être sensibles au colmatage et nécessiter généralement un dispositif de protection à l'amont. Ils sont le plus souvent installés dans la partie amont des canaux d'amenée

2.5. Dispositifs de franchissement piscicole et des embarcations

2.5.1. Dispositifs de franchissement piscicole

Les dispositifs de franchissement piscicole (passes-à-poissons pour la montaison et exutoires pour la dévalaison) peuvent être alimentés par tout ou partie du débit minimal lorsqu'ils sont implantés au droit de l'ouvrage de prise d'eau. Le dimensionnement des passes-à-poissons et des exutoires ne permet pas toujours d'assurer le même niveau de précision que celui requis pour les dispositifs de restitution du débit minimal. De manière générale, il est recommandé de porter une attention particulière au dimensionnement et à la réalisation de la ou des sections hydrauliques les plus amont qui contrôlent le débit des ouvrages. Une mesure de débit est également à prévoir lors de la mise en eau des ouvrages, afin de procéder aux éventuels réglages.

- **Passes à bassins :**

Le débit peut quelquefois être contrôlé par la seule cloison amont dans le cas de communications entre bassins par des échancrures dénoyées (niveau aval en-deçà de la cote de déversement). Cette configuration peut se rencontrer pour de petites passes à salmonidés à jet plongeant. Un bon niveau de précision sur le débit peut alors être atteint, tout résidant dans la détermination du coefficient de débit de la cloison amont et la sensibilité du débit aux variations du niveau amont.

Le débit est plus généralement contrôlé par les premières cloisons amont dans le cas de communications entre bassins par des orifices noyés ou par des échancrures et des fentes ennoyées par l'aval (niveau aval au-dessus de la cote de déversement). L'influence de l'ennoyement par l'aval se manifeste notamment lorsque des jets de surface sont mis en place (chutes entre bassins inférieures ou égales à 40% de la charge sur l'échancrure ou la fente). Il peut alors être plus délicat d'atteindre un bon niveau de précision sur le débit. Il faut en particulier tenir compte du fait que le coefficient de débit de la première cloison est généralement un peu supérieur aux coefficients de débit des cloisons suivantes du fait de conditions d'approche de l'écoulement moins agitées à l'amont que celles rencontrées dans les bassins où l'énergie des chutes est dissipée.

Dans les cas où il y a de fortes variations de niveau d'eau amont, on peut avoir recours à plusieurs orifices successifs noyés sur les cloisons amont d'une passe à bassins (en remplacement des échancrures ou fentes que l'on retrouve sur les cloisons aval). Cela permet de répartir la variation du niveau d'eau du plan d'eau amont sur les différents orifices, limitant ainsi l'amplitude des variations du débit restitué (Tableau 2). Dans le cas de 4 orifices successifs, une variation de ± 0.20 m du niveau d'eau amont se traduit par une variation de ± 0.05 m de la charge effective sur chaque orifice. L'utilisation des orifices successifs augmente les contraintes d'entretien et est donc recommandée en cas d'impossibilité d'aménager un dispositif de régulation du niveau d'eau amont, faute notamment d'alimentation électrique à hauteur de l'ouvrage de prise d'eau.

Dans la conception des passes à bassins, il est préconisé de prévoir des possibilités de réglage du débit par l'aménagement de rainures dans les échancrures ou les fentes, de manière à pouvoir ajuster leurs cotes de déversement après construction et bien transiter la valeur réglementaire. Pour le calcul des débits dans les passes à bassins, on peut notamment se référer à

Larinier et al. (1994) et à Wang et al. (2010) (passes à fentes verticales allant jusqu'au fond). Le logiciel Cassiopée peut également être utilisé comme aide aux calculs hydrauliques.

Variations du niveau d'eau amont :	- 0.20 m	- 0.10 m	0.00 m	+ 0.10 m	+ 0.20 m
Débit :	144 l/s	151 l/s	157 l/s	164 l/s	170 l/s
% de variation du débit :	- 8%	- 4%	0%	+ 4%	+ 8%

Tableau 2 : Sensibilité aux variations du niveau d'eau amont d'un dispositif constitué de 4 orifices successifs noyés de 30*30 cm (0.09 m²) avec des chutes entre bassins de 30 cm (coefficient de débit égal à 0.72 ; niveau à l'aval du 4^{ème} orifice considéré fixe).

- **Passes à ralentisseurs :**

Dans les passes à ralentisseurs, il est impératif de respecter rigoureusement les caractéristiques géométriques des ralentisseurs. Lors du dimensionnement, il est possible d'ajuster le débit transitant en faisant varier par homothétie la taille du canal et des ralentisseurs. Par contre, une fois construite, il est difficile de modifier ce type de passe pour corriger le débit sans en compromettre la fonctionnalité. Pour le calcul des débits dans les passes à ralentisseurs, on peut notamment se référer aux relations entre le débit et la charge amont pour différents types de ralentisseurs dans Larinier et al. (1994).

- **Rampes en enrochements jointifs ou à macrorugosités régulièrement réparties :**

Dans les rampes en enrochements jointifs (rugosité de fond uniquement), le débit est contrôlé par la pente et la rugosité des premiers mètres de la rampe à partir de sa crête. Dans les rampes à macrorugosités, le débit transitant est essentiellement contrôlé par la pente et les macrorugosités sur leurs 3-4 premières rangées, la rugosité de fond, importante pour le franchissement des poissons, jouant un rôle moindre. Pour ces types d'ouvrages, l'utilisation d'enrochements ne permet pas en phase projet d'assurer une précision sur le débit aussi bonne que dans les passes en génie civil. Les premiers retours d'expérience montrent des précisions de l'ordre de 10-20%. L'utilisation de macrorugosités moulées (préfabriquées ou coulées sur place) peut permettre de réduire les incertitudes liées à la variabilité des formes des enrochements.

Des ajustements post-construction peuvent permettre d'atteindre une bonne précision. En cas de suralimentation à la cote normale d'exploitation, on peut envisager de réduire le débit soit en rehaussant quelque peu la cote du fond sur les premiers mètres, soit en rajoutant ou en augmentant la taille des macrorugosités sur les premières rangées. En cas de sous-alimentation, on peut envisager soit de restituer le complément de débit par un autre dispositif (échancrure complémentaire dans le seuil par exemple), soit d'approfondir quelque peu la cote du fond sur les premiers mètres, soit de réduire la taille des macrorugosités des premières rangées. Pour le calcul des débits dans les rampes en enrochements jointifs ou à macrorugosités régulièrement réparties, on peut notamment se référer à Larinier et al. (2006).

- **Exutoires de dévalaison :**

Les exutoires de dévalaison doivent toujours se situer à proximité immédiate des plans de grille assurant le rôle d'arrêt des poissons, là où les courants tangentiels vont guider les poissons. Le débit est généralement contrôlé par déversement, de préférence par un seuil épais profilé ou un clapet. Pour limiter les réticences des poissons à s'engager dans les exutoires, il est de plus recommandé de positionner la section de contrôle du débit en retrait à l'aval. Le calage précis des cotes de déversement peut s'avérer délicat du fait de conditions d'approche de l'écoulement non optimales, avec des fortes vitesses, des décollements et des pertes de charge. Il pourra être important de prévoir des possibilités de réglages de la cote de déversement, avec l'aménagement de rainures ou la mise en place d'un clapet. Pour la conception et le dimensionnement des exutoires de dévalaison, on peut notamment se référer à Courret et Larinier (2008).

2.5.2. Dispositifs pour le franchissement des embarcations

Les dispositifs pour le franchissement des embarcations (canoë, kayak, raft) implantés au niveau des ouvrages de prise d'eau sont alimentés par tout ou partie du débit minimal. Le guide

technique sur ces dispositifs disponible auprès de la fédération française de canoë-kayak (FFCK 2011³) répertorie six types de dispositifs.

La plupart – passe à ralentisseurs (de fond), rampe en enrochements, passe à bassins successifs, pré-barrage ou rivières de contournement – peuvent selon les critères de dimensionnement adoptés, constituer des dispositifs mixtes assurant la descente des embarcations et la montaison des poissons. On peut s'appuyer sur les références citées dans le paragraphe précédent pour apprécier leur fonctionnement hydraulique et le débit transitant.

Pour les passes à ralentisseurs dites "mixtes", les formules utilisées sont chacune spécifiques à une forme de ralentisseurs. Pour le seul passage des embarcations, des formes de ralentisseurs de fond ou de chenal (section trapézoïdale) différentes de celles développées pour le passage des poissons ont été aménagées, sans toujours disposer de formules pour évaluer le débit.

La descente des embarcations peut également se faire par de simples glissières à fond lisse, en général de section semi-circulaire ou en anse de panier. Pour évaluer le débit, dans la mesure où la pente de la glissière est importante et engendre un passage en écoulement torrentiel, on peut considérer que la section d'entrée de la glissière, au niveau de la rupture de pente, se comporte comme un déversoir épais. Une attention particulière devra être portée au choix du coefficient de débit compte tenu des conditions d'approche particulières pour le passage des embarcations. Pour guider les pratiquants, il est notamment préconisé d'aménager un entonnement à l'amont de la glissière avec des bajoyers latéraux, ce qui va influencer sur les décollements latéraux au niveau de l'entrée. Par ailleurs, les sections de type en anse de panier posent des difficultés pour l'évaluation du débit du fait de l'absence de formules de déversoir adaptées.

Dans les cas où le débit réservé est insuffisant pour alimenter correctement les différents dispositifs de franchissement, il peut être installé à l'amont de la passe à canoës-kayaks un clapet ne s'ouvrant qu'au contact d'une embarcation qui le pousse.

2.6. Autres dispositifs : conduite en charge, piquage sur une conduite forcée, turbinage

Des systèmes de conduites en charge, éventuellement en siphon, peuvent être mis en œuvre au niveau de barrages particulièrement épais dans lesquels il est difficile d'aménager une échancrure ou un orifice. Le débit transitant par la conduite va alors dépendre :

- de la charge entre le niveau amont et le débouché de la conduite (ou le niveau aval si ce débouché est noyé),
- des pertes de charge linéaires liées à la longueur de la conduite, à sa rugosité et aux vitesses d'écoulement à l'intérieur,
- et des pertes de charge singulières induites au niveau des coudes, des rétrécissements ou élargissement, et des organes présents sur la conduite (vannes), également fonction des vitesses d'écoulement au droit des singularités.

Pour réaliser les calculs et le dimensionnement d'une conduite en charge, on peut notamment se référer à Idel'Çik (1986), à Pont-à-Mousson (1989) ou à Lencastre (1999).

Dans le cas d'une conduite en siphon, il faut prévoir au niveau de son point le plus haut un dispositif permettant d'extraire l'air de la conduite de manière à pouvoir remplir et amorcer le siphon. Les systèmes de conduites s'avèrent sensibles au colmatage et vont généralement nécessiter un dispositif de protection à l'amont.

Le débit minimal peut également être restitué à partir d'un piquage sur le départ d'une conduite forcée. Le piquage peut consister en un simple ajutage, ou se prolonger sous forme d'une conduite. Dans les 2 cas, le débit transitant va dépendre de la charge hydraulique dans la conduite forcée au droit du piquage et des caractéristiques de l'ajutage ou de la conduite. Les conditions d'écoulement dans la conduite forcée, où les vitesses peuvent être importantes, vont influencer sur le coefficient de débit de l'ajutage ou sur le coefficient de perte de charge singulière au départ de la conduite.

Pour ces cas particuliers de conduites en charge ou de piquage sur une conduite forcée, il est préconisé, au regard de la complexité et des incertitudes dans les calculs hydrauliques, de surdimensionner légèrement le dispositif par rapport au débit à transiter et de prévoir un organe permettant de régler le débit (vanne), ainsi qu'un dispositif de contrôle à l'aval.

³ Guide à demander via un formulaire sur le site internet de la FFCK <http://www.ffck.org/renseigner/index2.php3?page=savoir/patrimoine/site/bibliotheque/documents/>.

Dans le cas d'un débit minimal et d'une hauteur de chute au niveau de l'ouvrage de prise d'eau conséquents, il peut être envisagé de restituer le débit minimal par une turbine spécifique sous réserve de limiter les risques d'entraînement à la dévalaison et de garantir une alimentation suffisante des éventuels dispositifs de franchissement piscicole. Il faut alors prévoir le fait que la centrale peut s'arrêter du fait de dysfonctionnements soit dans l'usine elle-même, soit sur le réseau d'évacuation de l'énergie. Un dispositif de restitution alternatif doit alors immédiatement, et donc automatiquement, s'ouvrir à chaque arrêt (ouverture d'une vanne ou abaissement d'un clapet).



Figure 17 : Exemple de conduite en charge par syphon.

3. CHOIX ET CALAGE DES DISPOSITIFS SELON LES CONFIGURATIONS DE NIVEAU D'EAU AMONT

Le choix du dispositif, son dimensionnement et son calage par rapport au niveau d'eau amont doivent permettre de restituer une valeur de débit la plus proche possible du débit réglementaire, sachant qu'il est hydrauliquement difficile de restituer au litre au pourcentage près la valeur exacte du débit minimal en dehors de conditions de laboratoire. Les variations du niveau d'eau amont doivent être préalablement évaluées avec précision dans la gamme de débit entrant comprise entre le débit réservé et le débit maximal dérivé, augmenté de la valeur du débit réservé. De manière générale, deux configurations de niveau d'eau amont peuvent être rencontrées :

- **Cas où le niveau d'eau amont est régulé au niveau normal d'exploitation**

La régulation du niveau d'eau amont est généralement réalisée à partir d'une vanne ou d'un clapet motorisé, situés au niveau du barrage ou à l'entrée de la dérivation, et asservis à une sonde de mesure du niveau d'eau amont. Dans le cas de l'hydroélectricité, le niveau d'eau amont peut également être régulé en ajustant le débit turbiné. La précision attendue de la régulation est de l'ordre de 1 à 2 cm dans les situations favorables. Les dispositifs de restitution du débit minimal comme les échantures ou les orifices à faible charge peuvent alors être utilisés. En cas de régulation du niveau d'eau amont plus imprécise, on aura intérêt à adopter les dispositifs de restitution les moins sensibles aux variations du niveau d'eau amont, notamment les orifices à forte charge et les modules à masques. Le dispositif de restitution du débit minimal doit être dimensionné et calé par rapport à la cote minimale de régulation, de manière à assurer le respect du débit minimal en toutes circonstances.

- **Cas où le niveau amont n'est pas régulé**

Il y a 2 configurations dans lesquelles le niveau amont n'est pas régulé : d'une part des prises d'eau fonctionnant au fil de l'eau et non équipées d'un dispositif de régulation efficace, le niveau d'eau amont fluctue alors en fonction du débit amont et du débit prélevé, et d'autre part des retenues possédant des capacités de stockage-déstockage et dont le niveau varie souvent fortement (retenues hydroélectriques fonctionnant par écluses, retenues pour le soutien d'étiage, l'AEP ou l'irrigation).

L'amplitude des variations du niveau amont conditionne fortement le choix du type de dispositif de restitution du débit minimal et son dimensionnement. Pour les prises d'eau au fil de l'eau non régulées, si les variations en conditions d'exploitation s'avèrent importantes, la possibilité de mettre en place une régulation sera privilégiée. Lorsque les variations du niveau d'eau sont inévitables, deux approches peuvent alors être adoptées dans la conception du dispositif de restitution du débit minimal.

L'approche la plus simple, et la plus sûre, est de dimensionner et caler en altitude le dispositif par rapport à la cote minimale du niveau d'eau amont en phase d'exploitation, en acceptant qu'un débit supérieur à la valeur réglementaire soit délivré lorsque que le niveau amont est plus haut. Les dispositifs à privilégier sont alors les orifices à forte charge, les vannes ou les modules à masque.

Une seconde approche consiste à asservir le dispositif de restitution du débit minimal au niveau amont. Cela peut par exemple s'obtenir par la mise en place d'une vanne déversante ou d'un clapet motorisé dans une échancrure ou d'une électrovanne sur une conduite ou un ajutage. Cette solution présente l'avantage de pouvoir restituer un débit minimal constant quel que soit le niveau amont. Elle nécessite en revanche une alimentation électrique, ainsi que l'équipement d'une sonde mesurant le niveau d'eau amont si ce n'est pas déjà le cas. Le besoin de maintenance est également accru. Des solutions d'asservissement mécanique du dispositif de restitution, en utilisant notamment des systèmes de flotteurs, peuvent être envisagées. Elles sont réservées aux prises d'eau ne disposant pas d'alimentation électrique et requièrent un dimensionnement fin du flotteur et des mécanismes.

Un tableau récapitulatif de l'évolution du débit restitué en fonction du niveau d'eau amont sera établi par le permissionnaire.

Niveau d'eau amont	Cote NGF	Débit restitué dispositif 1	Débit restitué dispositif 2	Débit minimal total restitué
Cote minimale d'exploitation	122.47	150 L/s	100 L/s	250 L/s (valeur réglementaire)
Cote normale d'exploitation	122.50	155 L/s	103 L/s	258 L/s (+3.2%)
Cote d'exploitation avant déversement	122.60	166 L/s	111 L/s	277 L/s (+10.8%)

Tableau 3 : Exemple de tableau récapitulant la sensibilité des dispositifs aux variations du niveau d'eau amont en phase d'exploitation.

4. GESTION DU DISPOSITIF DE RESTITUTION DU DEBIT MINIMAL

4.1. Entretien

L'entretien des dispositifs de restitution du débit minimal est une obligation qui peut constituer une contrainte forte de gestion. Ces contraintes peuvent être atténuées par le choix de l'emplacement des dispositifs, leur conception (exposition aux risques d'obstruction ou à l'engrèvement ...) ou la mise en place de dispositifs de protection (drome, grille à large espacement ...). Il est fortement conseillé d'effectuer une visite de contrôle après chaque coup d'eau (voire tempête de vent). L'accès aux dispositifs doit pouvoir être assuré en tout temps, hors période de crues, pour leur entretien et en toute sécurité par les agents d'exploitation formés à cet effet.

4.2. Contrôle du débit minimal

Un dispositif de contrôle du débit minimal est recommandé pour permettre à l'exploitant, ainsi qu'aux services de contrôle de vérifier rapidement que le débit minimal est bien restitué. Ce dispositif doit être accessible et facile à contrôler par une simple lecture. Selon le type de dispositif de restitution du débit minimal, et les conditions hydrauliques, le contrôle du débit minimal peut s'opérer au niveau même du dispositif de restitution du débit minimal ou faire l'objet d'un dispositif spécifique aménagé en aval :

- **Contrôle du débit minimal au niveau même du dispositif de restitution**

Le débit minimal peut être contrôlé au niveau même du dispositif lorsque les relations hydrauliques peuvent être appliquées de manière fiable. Les conditions d'implantation du dispositif doivent en particulier satisfaire aux conditions d'application des formules hydrauliques et les conditions d'écoulement à l'approche du dispositif doivent être favorables et permettre une détermination précise des coefficients de débit.

Le dispositif de contrôle consiste alors généralement à mettre en place un repère ou une échelle limnimétrique permettant une lecture directe du niveau d'eau. La géométrie du dispositif doit pouvoir également être vérifiée. Le débit est calculé à partir de l'abaque "hauteur-débit" ou de la formule hydraulique utilisée lors du dimensionnement du dispositif, fournies par le permissionnaire dans une note de calcul.

Dans le cas d'orifices et pour des faibles débits, un dispositif de contrôle peut également être basé sur le point de chute du jet en sortie. Une échelle ou des repères doivent alors permettre de vérifier le respect de la distance minimale du jet à partir de laquelle le débit réservé est supérieur ou égal à la valeur réglementaire.

- **Contrôle du débit minimal par un dispositif spécifique aménagé en aval**

Lorsque des doutes pèsent sur l'applicabilité des formules et/ou la détermination des coefficients de débit, il est alors nécessaire d'aménager un dispositif spécifique pour contrôler le débit minimal en aval du ou des dispositifs de restitution.

Ces dispositifs spécifiques consistent généralement en des échancrures ou déversoirs précédés de bassins assurant de bonnes conditions d'implantation et d'approche de l'écoulement. Des systèmes de canaux Venturi normalisés sont envisageables, avec de même une attention particulière à porter aux canaux d'approche nécessaires.

Le tarage d'une section du cours d'eau à l'aval proche de l'ouvrage de dérivation, avant tout apport intermédiaire ou infiltration, est également possible. La section doit alors nécessairement présenter une morphologie stable (idéalement un seuil rocheux naturel) et faire l'objet de jaugeages réguliers. Le permissionnaire doit fournir la courbe de tarage de la section (relation hauteur-débit) et positionner une échelle limnimétrique permettant une lecture directe de la hauteur d'eau. L'équipement d'une sonde de mesure du niveau d'eau avec enregistrement en continu est recommandé, notamment pour la surveillance. Dans le cas d'un dispositif de contrôle aménagé à l'aval d'une passe-à-poissons, sa franchissabilité devra être assurée.

Que le dispositif de contrôle soit au niveau même du dispositif de restitution ou aménagé à l'aval, il est recommandé que le permissionnaire établisse la relation hauteur-débit du dispositif sur une gamme englobant la valeur réglementaire du débit minimal, par exemple entre 0.5 et 1.5 fois la valeur, de façon que les éventuels écarts puissent être rapidement évalués par l'exploitant et les services de contrôle.

Pour les très faibles débits réservés, inférieurs à 5 L/s, le dispositif devra permettre leur contrôle par la méthode par capacité, en prévoyant les éventuels aménagements nécessaires (bassin équipé de vanne de vidange, ...).

Dans le cas de turbinage du débit minimal, le contrôle peut être réalisé à partir de la puissance produite, de la chute, et des abaques de fonctionnement de la centrale fournis par le permissionnaire. Un affichage extérieur de la puissance produite, et si possible de la chute, est donc à prévoir pour les services de contrôle. La chute peut également être vérifiée en positionnant 2 échelles limnimétriques à l'amont et à l'aval de la centrale, avec impérativement le même repère d'altitude.



Figure 18 : Exemples de dispositifs de contrôle du débit minimal.

4.3. Moyens de surveillance

Les moyens de surveillance sont destinés à permettre à l'exploitant de vérifier à distance le bon fonctionnement de ses installations :

- **Télésurveillance du niveau d'eau.** L'enregistrement en continu du niveau d'eau sur les dispositifs de restitution ou de contrôle, accompagné de la position des organes asservis le cas échéant, permet le calcul en direct de la valeur du débit restitué et la détection de certains dysfonctionnements (déréglage ou panne du dispositif de régulation, obstruction du dispositif de restitution dans le cas d'un dispositif de contrôle aménagé à l'aval).
- **Vidéosurveillance.** La vidéosurveillance du dispositif de restitution permet d'alerter l'exploitant d'un dysfonctionnement lié par exemple à un problème d'obstruction que ne détectera pas un enregistrement du niveau d'eau (lorsque le contrôle s'effectue au niveau même de dispositif de restitution).
- **Suivi météorologique.** Un suivi météorologique peut permettre de déclencher les inspections et interventions d'entretien après les événements pluvieux susceptibles d'avoir générés un coup d'eau.

4.4. Modulation du débit minimal

L'adoption d'un débit minimal modulé implique d'adapter les dispositifs de restitution du débit minimal. Soit la géométrie du dispositif est modifiée, le plus souvent par changement du gabarit (plaques métalliques amovibles dans laquelle est aménagé l'orifice calibré ou le déversoir). En cas de dispositif réglable ou asservi (vanne, clapet), la cote de réglage sera ajustée. Soit plusieurs dispositifs sont aménagés et sont en position ouverte ou fermée selon la période. Le module à masques permet d'ajuster facilement la valeur saisonnière du débit minimal en jouant sur l'ouverture du nombre de masques à calibrage spécifique.

4.5. Cas particulier des très faibles débits réservés

Il s'agit des dispositifs équipant les prises d'eau de petits cours d'eau d'altitude dont le module est inférieur à 50 L/s. La valeur plancher du débit minimal prise en application de l'article L. 214-18 peut alors être inférieure à 5 L/s. La conception de dispositifs de restitution fonctionnels pour de tels débits est contrainte par la faible section d'écoulement qui les expose aux risques d'obstruction et/ou aux risques de gel. La difficulté ne relève pas d'une impossibilité technique, mais plutôt des contraintes d'entretien qui peuvent être telles qu'elles ne permettent pas de garantir en permanence la restitution de ce débit, d'autant que ces prises d'eau sont souvent difficilement accessibles, voire inaccessibles en période hivernale.

Pour assurer une alimentation fiable, il convient de s'orienter vers un orifice à jet libre moins sensible au gel et aux risques d'obstruction. Il est considéré que son diamètre doit être au minimum de 0.05 m, avec une hauteur de charge minimale sur le centre de l'orifice de 0.30 m, soit un débit minimal restitué de l'ordre de 3 L/s (coefficient de débit égal à 0.6). Il est donc fortement recommandé de ne pas fixer un débit minimal inférieur à 3 L/s afin que le maître d'ouvrage ne se retrouve pas en situation infractionnelle chronique.

5. FORMULATION DE L'ARRETE DE PRESCRIPTIONS OU DU REGLEMENT D'EAU

5.1. Dispositif de restitution du débit minimal

Le respect de l'obligation de résultat dépend très fortement, comme démontré ci-dessus, des moyens mis en œuvre pour cette restitution. Aussi apparaît-il indispensable que ces moyens soient décrits et étudiés dans le cadre de l'instruction et suffisamment détaillés dans l'arrêté de prescriptions ou le règlement d'eau, afin notamment d'en faciliter le contrôle ultérieur. »

Aussi, la part du débit minimal devant transiter par les différents dispositifs de restitution pourra être indiquée, de même que les caractéristiques géométriques et le calage altimétrique (cotes NGF) de chacun d'entre eux.

L'arrêté de prescriptions ou le règlement d'eau ont vocation à décrire l'obligation de moyens de façon à en permettre le contrôle. Il est ainsi recommandé que soient précisés :

- la cote normale d'exploitation ou cote normale de retenue (cote NGF), pourra être complétée par la cote minimale d'exploitation découlant de la capacité de régulation du niveau d'eau amont.
- la localisation du ou des dispositifs participant à la restitution du débit minimal.
- la géométrie des dispositifs spécifiques (hors dispositifs de franchissement décrits par ailleurs).
- le calage altimétrique (cotes NGF) ou la hauteur de charge sur les dispositifs par rapport à la cote du niveau d'eau amont correspondant à la cote normale d'exploitation.
- dans le cas des prises par en-dessous, la cote minimale d'exploitation du niveau d'eau amont en situation de débit entrant égal au débit minimal turbinable augmenté de la valeur du débit réservé.

...

5.2. Dispositif de contrôle du débit minimal

En cas de mise en place d'un dispositif de contrôle du débit minimal indépendant du dispositif de restitution, destiné à contrôler l'obligation de résultat, l'arrêté de prescriptions ou le règlement d'eau pourront utilement préciser :

- son implantation
- sa géométrie
- la hauteur de charge minimale
- l'aménagement d'une échelle limnimétrique permettant la lecture de la hauteur de charge
- la fourniture de la courbe de tarage afin de faciliter le calcul de l'écart entre la valeur réglementaire et la valeur restituée.

5.3. Conformité des dispositifs

Afin de vérifier la conformité des dispositifs de restitution ou de contrôle du débit minimal, l'arrêté de prescriptions ou le règlement d'eau pourront prévoir la remise d'une note comprenant les relevés cotés de la géométrie des dispositifs réalisés ainsi qu'un rapport de jaugeage.

Références

Blevins RD, 1984. Applied Fluid dynamics hanbook. ISBN : 1-57524-182

Bos MG, 1989. Discharge Measurement Structure (3rd edition). International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. Publication 20. ISBN : 90-70754-15-0. (<http://content.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub20/pub20.pdf>)

Carlier M, 1986. Hydraulique générale et appliquée (3e édition). Editions Eyrolles - EDF. ISBN13 : 978-2-212-01545-4. 582 p.

Courret D et Larinier M, 2008. Guide pour la conception de prises d'eau "ichtyocompatibles" pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.08.04. 72 p. (http://www.onema.fr/IMG/pdf/2008_027.pdf).

FFCK, 2011. Les dispositifs de franchissement d'ouvrages. Les cahiers techniques des équipements de canoë-kayak. 69 p.

Idel'cik IE, 1986. Mémento des pertes de charges - Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement (3e édition). Editions Eyrolles - EDF. ISBN13 : 978-2-212-05900-7. 504 p.

Larinier M, Porcher JP, Travade F et Gosset C, 1994. Passes à poissons - Expertise, Conception des ouvrages de franchissement. Collection Mise au Point. 335 p.

Larinier M, Courret D et Gomes P, 2006. Guide technique pour la conception des passes "naturelles". Rapport GHAAPPE RA.06.06-V1.66 p. (http://www.onema.fr/IMG/pdf/2006_060.pdf).

Le Coz J, Camenen B, Dramais G, Ribot-Bruno J, Ferry M, et Rosique JL, 2011. Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L.214-18 du code de l'environnement. Collection Guides techniques de la police de l'eau. 132 p.

Lencastre A, 1999. Hydraulique générale. Editions Eyrolles. ISBN13 : 978-2-212-01894-3. 633 p.

Pont-A-Mousson, 1989. Formulaire - Troisième édition. Editions Lavoisier. ISBN : 9782852065604. 280 p. (extrait sur les canalisations téléchargeable : <http://www.saint-gobain-pam.pt/images/add/formulaire/hydrauli.pdf>).

Wang RW, David L and Larinier M, 2010. Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems (2010) 396, 02.

Nota bene : Cette note technique est accessible par le Référentiel Milieu Aquatique Document d'Incidences (RefMADI) administré par l'Onema.