

ADEME



**GUIDE POUR LA CONCEPTION DE PRISES D'EAU
« ICHTYOCOMPATIBLES » POUR LES PETITES CENTRALES
HYDROELECTRIQUES**

NOVEMBRE 2008

D. COURRET ET M. LARINIER

RAPPORT GHAPPE RA.08.04



**Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles
et à la Protection de l'Environnement**

AVANT PROPOS

Cette étude sur la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques a fait l'objet d'un financement de l'ADEME¹ et d'un autofinancement du temps passé par chacun des membres du comité de pilotage.

L'étude s'est déroulée sous la responsabilité scientifique de Michel Larinier, directeur du GHAAPPE² - pôle R&D Ecohydraulique de l'ONEMA³. La rédaction du document a été effectuée par Dominique Courret et Michel Larinier.

Le comité de pilotage était constitué de :

- Jean-François Bansard, directeur technique THEE, groupe Hydroeo⁴.
- Dominique Baril, ONEMA, délégation interrégionale de Montpellier.
- Jean-Marie Cerutti, représentant de France Hydroélectricité⁵.
- Jacques Chorda, ingénieur de recherche HYDROECO – IMFT.
- Pierre Flipo, directeur BETERU⁶, représentant d'EAF⁷.
- Jacques Fonkenell, directeur technique MJ2⁸
- Pierre Goudal, EDF CIH.
- Michel Larinier, ONEMA, directeur du GHAAPPE.
- Katrin Liné, EDF CIH.
- François Travade, EDF R&D.

Cette étude a permis d'identifier certains besoins en R&D et débouche notamment sur les expérimentations sur modèles réduits menées au Laboratoire d'Etude Aérodynamique (LEA) de Poitiers. Ces expérimentations constituent l'action 11 du programme de R&D sur l'anguille entériné par le Groupe Technique « Ouvrage », créé par le MEEDDAT⁹ et le MAP¹⁰, en charge du plan de gestion national pour la reconstitution du stock d'anguilles (mise en œuvre du règlement européen).

Ce document sera appelé à évoluer en intégrant notamment les conclusions des expérimentations menées au LEA et des suivis biologiques, ainsi que le retour d'expérience acquis sur les projets-pilotes.

¹ ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ; www.ademe.fr.

² GHAAPPE : Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles et à la Protection de l'Environnement (ONEMA – CEMAGREF – INPT).

³ ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques ; www.onema.fr.

⁴ THEE : Techniques HydroElectriqueS ; www.hydroeo.eu.

⁵ France HydroElectricité (GPAE – ECOWATT) ; www.france-hydro-electricite.fr.

⁶ BETERU : Bureau d'Etudes Techniques d'Equipement Rural et Urbain ; <http://beteru.free.fr>.

⁷ EAF : Electricité Autonome Française ; www.federation-eaf.org.

⁸ MJ2 ; <http://www.vlh-turbine.com>.

⁹ MEEDDAT : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire.

¹⁰ MAP : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

SYNTHESE

La conciliation des intérêts de l'hydroélectricité et des intérêts écologiques des cours d'eau, respectivement prônés par les directives européennes SER (développement d'énergie renouvelable) et DCE (entre autre restauration de la continuité écologique), et l'atteinte des objectifs du règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles nécessitent de limiter voire d'annuler les dommages liés à la dévalaison des poissons au niveau des centrales hydroélectriques (mortalités au passage par les turbines).

La problématique de la dévalaison concerne principalement 3 espèces diadromes pour lesquelles cette migration est indispensable à l'accomplissement de leur cycle de vie : les juvéniles (smolts) de saumon atlantique et de truite de mer et les anguilles argentées. Ces espèces sont particulièrement concernées étant donné que toute ou partie de leur population dévalent depuis les parties hautes et moyenne des bassins versants et sont donc susceptibles d'avoir à franchir plusieurs aménagements hydroélectriques. La problématique se pose avec d'autant plus d'acuité pour les anguilles qui subissent de fortes mortalités au passage par les turbines du fait de leur taille importante. Pour ces espèces, les objectifs de survie à chaque aménagement doivent ainsi être fixés à des valeurs proches de 100%, de façon à limiter le cumul des mortalités lors de la présence de plusieurs aménagements sur un axe de migration.

D'un point de vue réglementaire, la mise en œuvre de solutions à la dévalaison des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique et de truite de mer concerne :

- les ouvrages existants et nouveaux situés sur les cours d'eau classés au titre de l'article L.432-6, lorsque ces espèces sont inscrites aux listes fixées par arrêté, et tant que ces classements ne sont pas remplacés par ceux au titre de l'article L.214-17 (2014 au plus tard).
- les ouvrages existants situés sur les cours d'eau classés, au titre de l'article L.214-17, dans la première liste du fait de la nécessité d'une protection complète des poissons migrateurs, lors de leur renouvellement de concession ou d'autorisation.
- les ouvrages existants et nouveaux sur les cours d'eau classés, au titre de l'article L.214-17, dans la seconde liste du fait de la nécessité d'assurer la circulation des poissons migrateurs, dans un délai de cinq ans après parution des listes pour les ouvrages existants.
- Pour l'anguille, à court terme les ouvrages situés dans les zones d'action prioritaires, et à plus long terme les ouvrages situés dans les territoires d'action définis dans le cadre du règlement européen pour la reconstitution du stock, les zones d'action prioritaires devant être au final en adéquation avec les classements des cours d'eau au titre de l'article L.214-17.

Les prises d'eau « ichtyocompatibles » constituées de plans de grilles fines associés à un ou plusieurs exutoires constituent une des solutions au problème de mortalités des poissons au passage par les turbines, les autres solutions étant l'arrêt ciblé des turbines, les turbines « ichtyocompatibles », les dispositifs de capture-transport et les barrières comportementales.

Une prise d'eau « ichtyocompatible » doit permettre (1) d'arrêter les poissons et les empêcher ainsi de passer par les turbines, (2) de les guider vers un système de transfert (exutoire) et (3) de les acheminer à l'aval de l'aménagement sans dommages.

Le retour d'expérience sur les différents dispositifs de grilles fines montre qu'un dispositif satisfaisant au mieux à la fois aux contraintes liées à la dévalaison et aux contraintes d'exploitation hydroélectrique (perte de charge, entretien) peut être obtenu en adaptant les plans de grille conventionnels pour qu'ils assurent de manière efficace l'arrêt et le guidage des poissons vers un exutoire.

Deux configurations de prises d'eau « ichtyocompatibles » sont envisageables :

- Soit un plan de grille quasi vertical et orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement ; l'exutoire est alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille. Dans le cas d'un long plan de grille, des exutoires intermédiaires peuvent être installés.
- Soit un plan de grille très incliné en coupe par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à l'écoulement ; un ou plusieurs exutoires selon la largeur sont alors positionnés au sommet du plan de grille.

Les critères biologiques de dimensionnement portent sur :

- L'espacement libre maximal entre les barreaux pour arrêter les poissons.

De façon générale, on peut préconiser d'adopter un espacement libre maximal entre les barreaux de 2.5 cm pour les smolts de saumon atlantique et de truite de mer (barrière comportementale). Le recours à des espacements inférieurs constituant une barrière physique (jusqu'à 1.2 – 1.5 cm) peut néanmoins se justifier pour obtenir une efficacité maximale du dispositif de dévalaison lorsque les mortalités au passage par les turbines sont totales ou très importantes (aménagement de haute chute notamment).

Etant donné le comportement des anguilles qui ont tendance à aller au contact de la grille, voire à forcer le passage au travers, il est nécessaire d'installer une barrière physique pour les arrêter et les obliger à prospecter la prise d'eau et trouver un exutoire. L'espacement libre maximal à adopter sera fonction des caractéristiques de la population en amont de l'aménagement (taille des individus dévalant, sex ratio). Les plus petites anguilles (généralement des mâles) subissant des mortalités moindres au passage par les turbines que les gros individus, on peut envisager une protection incomplète de cette frange de la population et ainsi préconiser d'adopter pour les anguilles un espacement libre maximal entre les barreaux de l'ordre de 1.5 – 2.0 cm.

- La vitesse normale au plan de grille maximale pour ne pas risquer le placage des poissons sur la grille ou leur passage prématuré au travers : de l'ordre de 50 cm/s pour les smolts et les anguilles, le colmatage partiel de la grille devant être pris en compte lors de son dimensionnement.
- l'inclinaison minimale du plan de grille à 26° par rapport à l'horizontale ou l'orientation minimale à 45° par rapport à la direction de l'écoulement pour assurer le guidage des poissons (attention aux conventions de mesure des angles : l'inclinaison ou l'orientation sont d'autant plus prononcées que l'angle est faible).
- Le débit minimal transitant dans le ou les exutoires de 2% à 10% du débit maximum turbiné et les dimensions minimales d'un exutoire égales à 0.5 m pour la largeur et la hauteur d'eau.

Ces critères, en particulier vis-à-vis de l'anguille, sont susceptibles de s'affiner au regard des résultats des expérimentations futures.

L'installation d'une prise d'eau « ichtyocompatible » amène généralement à adopter un espacement libre entre les barreaux réduit par rapport à un plan de grille conventionnel. Cela pose les questions des pertes de charge au passage du plan de grille et de l'entretien (dégrillage), la quantité de corps arrêtés par la grille étant accrue.

La formule d'évaluation des pertes de charge au passage du plan de grille récemment proposée par Meusburger (2002) est présentée. Son utilisation est préférée aux formules plus anciennes, étant donné qu'elle prend en compte l'ensemble des paramètres, dont notamment le degré d'obstruction de la grille (barreaux, entretoises et éléments du support), l'orientation en plan par rapport à la direction de l'écoulement et le colmatage de la grille.

Le dimensionnement de plans de grille « ichtyocompatibles » a été effectué à titre d'exemple, pour chacune des configurations, au niveau de prises d'eau de turbine Kaplan de basse chute, et pour plusieurs débits turbinés entre 5 et 150 m³/s, ce qui englobe la majorité des prises d'eau de centrales en France.

Dans le cas des plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale, il en ressort que les dimensions des prises d'eau semblent permettre l'insertion de la surface minimale de plan de grille en adoptant l'angle d'inclinaison minimal. Les vitesses normales obtenues sont inférieures à la valeur maximale. Les longueurs de grille augmentent par contre rapidement avec la hauteur d'eau. Dans cette configuration, les pertes de charge au passage des plans de grille « ichtyocompatibles » sont voisines de celles induites par un plan de grille conventionnel, l'augmentation du degré d'obstruction de la grille du fait des espacements réduits étant compensée par l'inclinaison et les plus grandes surfaces de grille.

Dans le cas des plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement, il ressort que l'insertion de la surface minimale de plan de grille dans les dimensions données amène parfois à adopter une orientation plus prononcée que la valeur préconisée. Dans cette configuration, les pertes de charge au passage des plans de grille « ichtyocompatibles » se révèlent nettement supérieures à celles induites par un plan de grille conventionnel.

Par conséquent, parmi les deux configurations envisageables, il semble préférable d'installer un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à la direction de l'écoulement, cette disposition n'induisant a priori pas d'augmentation des pertes de charge par rapport à un plan de grille conventionnel et étant favorable à un certain autonettoyage de la grille. La faisabilité de cette configuration au niveau des prises d'eau profondes est cependant compliquée étant donné les importantes longueurs de bras du dégrilleur à déployer et les questions de porte-à-faux. On aura donc intérêt à limiter la hauteur d'eau au niveau du plan de grille.

L'installation de plans de grille quasi-verticaux et orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement reste envisageable, en particulier au niveau des prises d'eau profondes ou à fortes variations de niveau. Vis-à-vis des pertes de charge, on aura intérêt à adopter l'orientation minimale à 45° et à éviter les orientations plus prononcées. Pour ce faire, la vitesse d'approche ne doit pas dépasser 0.65-0.7 m/s, ce qui va parfois nécessiter de modifier les dimensions des prises d'eau (élargissement ou approfondissement). D'autre part, pour limiter voire éviter l'augmentation des pertes de charge par rapport à un plan de grille conventionnel, on peut envisager d'avoir recours à des formes de barreaux profilés et/ou assembler la grille en conservant les barreaux dans le sens de l'écoulement. Dans cette configuration, une attention devra être portée à la question du courant transversal auquel sera soumis la partie immergée du dégrilleur.

L'accent est mis sur la nécessité d'un dégrilleur adapté au type de corps charriés et correctement dimensionné. Quelle que soit la configuration, l'évolution des pertes de charge en fonction du colmatage met en évidence la nécessité d'asservir le système de dégrillage à une perte de charge maximale de l'ordre de 5-10 cm pour limiter les taux de colmatage à 20-40% et éviter ainsi une augmentation des vitesses normales trop importante risquant d'induire le placage des poissons sur la grille ou leur passage au travers.

Pour les nouveaux aménagements situés sur des cours d'eau à migrateurs (smolts de saumon atlantique et de truite de mer et/ou anguilles argentées), dans la mesure où la législation les autorise, les turbines « ichtyocompatibles » et les prises d'eau « ichtyocompatibles » apparaissent en l'état actuel des connaissances comme les deux seules solutions permettant d'éviter les mortalités au passage par les turbines et ainsi de ne pas aggraver la situation de la dévalaison (principe DCE de non dégradation de l'état existant). De plus, ces deux solutions présentent l'avantage d'être multispecifics.

Au niveau des aménagements existants, la mise en œuvre d'une solution à la dévalaison est à étudier au cas par cas. L'installation d'une prise d'eau « ichtyocompatible » suppose généralement de modifier le plan de grille (réduction de l'espacement libre, augmentation de la surface de grille, changement de disposition), voire de modifier la prise d'eau.

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	1
2.	La problématique de la dévalaison.....	3
3.	Les différentes solutions aux problèmes de mortalités dans les turbines.....	5
4.	Les différents dispositifs de grilles fines.....	8
5.	Principes des prises d'eau « ichtyocompatibles »	13
6.	Arrêt des poissons	15
7.	Guidage des poissons	18
8.	Passage des poissons vers l'aval.....	20
9.	Aspects hydrauliques des plans de grille.....	26
10.	Colmatage et dégrillage	42
11.	Dimensionnement de prises d'eau « ichtyocompatibles »	47
12.	Conclusions et perspectives.....	57
13.	Bibliographie.....	58
	Annexe 1 : Aspects hydrauliques dans les dispositifs de dévalaison	61
	Annexe 2 : Fiches d'aménagement	68

1. INTRODUCTION

La Directive européenne SER (directive 2001/77/CE) a pour objet de créer un cadre qui facilite un accroissement significatif à moyen terme de la production d'électricité à partir de Sources d'Energie Renouvelables (SER), en particulier de la petite hydroélectricité. En France, la PPI (programmation pluriannuelle des investissements de production électrique) prévoit en hydroélectricité l'installation de 500 MW à l'horizon 2010 et de 2000 MW à l'horizon 2015, notamment pour participer à la réalisation de l'objectif selon lequel 21% de la consommation intérieure brute du pays doit être d'origine renouvelable en 2010. Courant 2008, un plan de relance de l'hydroélectricité a été annoncé par le MEEDAT dans le cadre de la loi du Grenelle de l'environnement. Cela se traduit par de nombreuses demandes de suréquipement d'installations existantes ou de création de nouvelles centrales, en particulier sur des seuils existants non équipés.

La Directive européenne Cadre sur l'Eau (directive 2000/60/CE) établit par ailleurs un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau et met l'accent sur la protection de l'environnement. L'un des objectifs pour les Etats membres est de rendre opérationnels des programmes de mesures destinées à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai de quinze ans un objectif général de bon état écologique des eaux superficielles (ou de bon potentiel écologique dans le cas de masses d'eau fortement modifiées). Parmi les paramètres de la qualité hydromorphologique, la continuité écologique apparaît comme l'un des évaluateurs de l'état des masses d'eau de surface. Ce terme englobe plus particulièrement la possibilité d'assurer la libre circulation de la faune piscicole tout au long des cours d'eau, non seulement à la montaison, mais aussi à la dévalaison, en particulier au niveau des prises d'eau des centrales hydroélectriques.

Suite à la constatation de la baisse dramatique du stock d'anguilles qui ne se situerait plus dans les limites biologiques de sécurité (EIFAC/ICES 2007), un règlement européen impose à chaque état membre d'élaborer un plan de gestion de façon à atteindre l'objectif d'« *assurer avec une grande probabilité un taux d'échappement vers la mer d'au moins 40% de la biomasse d'anguilles argentées correspondant à la meilleure estimation possible du taux d'échappement qui aurait été observé si le stock n'avait subi aucune influence anthropique* » (Journal Officiel de l'Union Européenne du 22/09/2007). Parmi les multiples facteurs de diminution du stock identifiés, les problèmes de libre circulation de l'espèce dans les cours d'eau sont évoqués. Les obstacles à la migration et en particulier les aménagements hydroélectriques ont un effet négatif sur la population d'anguille se manifestant de deux manières : franchissements partiels d'obstacles à la montée qui se traduit par un déficit en habitat pour la croissance des individus, et surtout dommages subis par les anguilles argentées lors de leur passage par les turbines. La protection des anguilles en dévalaison apparaît donc comme une priorité, sur les aménagements nouveaux comme sur les aménagements existants.

La conciliation de l'hydroélectricité et de la protection des poissons pour la recherche du bon état écologique et l'atteinte des objectifs du règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles nécessitent de limiter voire d'annuler les dommages liés à la dévalaison des poissons au niveau des centrales hydroélectriques. L'expérience a montré qu'il est très difficile de trouver des solutions vraiment satisfaisantes au niveau des prises d'eau des centrales dans leur conception actuelle. La prise en compte a posteriori des contraintes biologiques, en particulier pour l'anguille, peut se traduire par des modifications importantes des structures existantes, avec des rapports coût-efficacité qui peuvent s'avérer discutables. Il paraît donc indispensable de prendre en compte dès la conception des prises d'eau, non seulement les contraintes d'exploitation, mais aussi les contraintes biologiques liées à la dévalaison des poissons.

L'objectif de ce guide est de définir les bases de conception et de dimensionnement des prises d'eau « ichtyocompatibles », définies comme les dispositifs constitués de plans de grilles fines associés à un ou plusieurs exutoires, en prenant en compte à la fois la dévalaison des différentes espèces piscicoles et les contraintes d'exploitation et de maintenance liées à la production hydroélectrique. La gamme de débit visée va des plus petits débits jusqu'à des débits de l'ordre de 150-200 m³/s, ce qui englobe la majorité des prises d'eau de surface des centrales hydroélectriques en France. Pour des débits plus importants, la conception des prises d'eau fait appel à des études particulières.

Dans une première partie, la problématique de dévalaison des poissons est succinctement rappelée. Les différentes solutions aux problèmes de mortalité dans les turbines sont passées en

revue. On présente ensuite plus en détails les différents dispositifs de grilles fines afin de dégager le ou les types de dispositif les plus à même de constituer une prise d'eau « ichtyocompatible » satisfaisant à la fois aux contraintes liées à la dévalaison des poissons et aux contraintes d'exploitation. Les trois fonctions - arrêt des poissons, guidage et transfert à l'aval – sont alors détaillées et les critères biologiques de dimensionnement sont dégagés. L'installation de prises d'eau « ichtyocompatibles » posant la question des pertes de charge et la question de leur entretien, on s'intéresse ensuite aux aspects hydrauliques des plans de grille, ainsi qu'à la problématique de leur colmatage et de leur dégrillage. La démarche de dimensionnement d'une prise d'eau « ichtyocompatible » est enfin détaillée et l'exercice est mené à titre d'exemple pour des débits turbinés entre 5 et 150 m³/s.

En annexe 1, les aspects hydrauliques au niveau des seuils ou clapets de déversement et des canaux ou conduites d'évacuation vers l'aval sont abordés. En annexe 2, des fiches présentent certains aménagements exemplaires ou du moins remarquables vis-à-vis de la problématique.

2. LA PROBLEMATIQUE DE LA DEVALAISON

La migration de dévalaison, c'est-à-dire la migration qui s'effectue de l'amont vers l'aval des cours d'eau, concerne de nombreuses espèces de poissons à différents stades. Les distances parcourues et l'importance de la dévalaison dans le cycle biologique sont néanmoins très variables selon les espèces.

2.1. La problématique de dévalaison au niveau d'une centrale hydroélectrique

En l'absence de dispositif spécifique, la dévalaison des poissons au niveau d'une centrale hydroélectrique peut s'effectuer soit par les ouvrages évacuateurs (déversoirs, vannes, clapets, ...), soit par les turbines. La répartition des poissons dévalant entre ces deux voies de passage dépend de la répartition des débits en période de dévalaison, des conditions hydrauliques dans la retenue (courantologie, conditions de déversement) et du comportement migratoire de l'espèce considérée. En France, le passage par les déversoirs est rarement dommageable pour les poissons, en particulier dans le cas des barrages de hauteur modérée (moins de 10 m). Le passage des poissons par les turbines peut en revanche être source de blessures et de mortalités immédiates et retardées du fait des chocs sur les parties mobiles ou fixes des turbines, des fortes variations de pression ou des cisaillements importants.

2.2. Les espèces concernées par la problématique de la dévalaison

La problématique de la dévalaison se pose en premier lieu pour les espèces diadromes¹¹ pour lesquelles cette migration est indispensable à l'accomplissement de leur cycle de vie. Trois espèces sont principalement concernées :

- les juvéniles (smolts) de saumon atlantique et de truite de mer.
- les anguilles argentées.

Ces espèces sont particulièrement concernées étant donné que toute ou partie de leur population dévalent depuis les parties hautes et moyenne des bassins versants et sont donc susceptibles d'avoir à franchir plusieurs aménagements hydroélectriques. La problématique se pose avec d'autant plus d'acuité pour les anguilles qui subissent de fortes mortalités au passage par les turbines du fait de leur taille importante. Pour ces espèces, les objectifs de survie à chaque aménagement doivent ainsi être fixés à des valeurs proches de 100%, de façon à limiter le cumul des mortalités lors de la présence de plusieurs aménagements sur un axe de migration.

En l'état actuel des connaissances, la dévalaison ne semble pas problématique pour les autres espèces diadromes (aloses et lamproies), le nombre d'aménagements hydroélectriques présents sur leurs axes de migration et/ou leur sensibilité au passage par les turbines étant généralement moindres.

La dévalaison ne semble également pas problématique pour les espèces potamodromes¹², à l'exception du cas particulier des populations de truites au niveau des prises d'eau de montagne.

En France, la dévalaison des smolts de saumon atlantique et de truite de mer se déroule essentiellement en mars, avril et mai, et est notamment contrôlée par la durée du jour, les augmentations de débit et de température de l'eau. La majorité des juvéniles smoltifie à 1 an pour des tailles entre 12 et 17 cm et le reste à 2 voire 3 ans pour des tailles entre 15 et 22 cm (Heland et Dumas 1994).

¹¹ Espèces diadromes : espèces vivant alternativement en eau douce et en eau salée.

¹² Espèces potamodromes : espèces accomplissant tout leur cycle de vie en eau douce.

La dévalaison de l'anguille argentée se déroule principalement d'octobre à mars, souvent sur des coups d'eau. Les mâles mesurent généralement entre 30 et 50 cm et les femelles entre 40 et 90 cm, voire plus (Holzner, 1999 ; Acou, 1999 ; Gosset et al, 2002 ; DWA, 2005). Au sein d'un bassin versant, la proportion d'anguille femelle dans la population en place a tendance à augmenter au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

2.3. Les cours d'eau concernés

D'un point de vue réglementaire, la mise en œuvre de solutions à la dévalaison des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique et de truite de mer concerne :

- les aménagements existants et nouveaux situés sur les cours d'eau classés au titre de l'article L.432-6, lorsque ces espèces sont inscrites aux listes fixées par arrêté, et tant que ces classements ne sont pas remplacés par ceux au titre de l'article L.214-17 (2014 au plus tard).
- les aménagements existants situés sur les cours d'eau classés, au titre de l'article L.214-17, dans la première liste du fait de la nécessité d'une protection complète des poissons migrateurs, lors de leur renouvellement de concession ou d'autorisation.
- les aménagements existants et nouveaux sur les cours d'eau classés, au titre de l'article L.214-17, dans la seconde liste du fait de la nécessité d'assurer la circulation des poissons migrateurs, dans un délai de cinq ans après parution des listes pour les ouvrages existants.
- Pour l'anguille, à court terme les aménagements situés dans les zones d'action prioritaires, et à plus long terme ceux situés dans les territoires d'action définis dans le cadre du règlement européen pour la reconstitution du stock, les zones d'action prioritaires devant être au final en adéquation avec les classements des cours d'eau au titre de l'article L.214-17.

3. LES DIFFERENTES SOLUTIONS AUX PROBLEMES DE MORTALITES DANS LES TURBINES

Les solutions aux problèmes de mortalités dans les turbines peuvent être de plusieurs types :

1) L'arrêt ciblé des turbines en période de dévalaison, les poissons passant alors par les ouvrages évacuateurs.

2) L'installation de turbines « ichtyocompatibles », c'est-à-dire des turbines n'induisant pas ou très peu de dommages sur les poissons.

3) La capture des poissons dévalant en amont d'un ou de plusieurs aménagements et leur transport à l'aval.

4) L'installation de barrières comportementales agissant sur les poissons via divers stimuli (visuels, auditifs, électriques ou hydrodynamiques) pour les éloigner de la prise d'eau.

5) L'installation de barrières physiques à l'aide de grille fine permettant d'arrêter les poissons et d'éviter leur passage par la prise d'eau.

Lors de l'installation de barrières comportementales ou physiques, il est généralement nécessaire d'offrir une voie de passage sûre pour les poissons avec l'ouverture d'un exutoire. La difficulté réside alors dans le fait de faire transiter tous les poissons dans la fraction réduite du débit transitant par l'exutoire (débit non turbiné).

3.1. L'arrêt ciblé des turbines en période de dévalaison

L'arrêt ciblé des turbines en période de dévalaison est une solution pouvant se révéler très efficace, mais pouvant aussi générer d'importantes pertes de production. Au niveau d'un aménagement, cette solution ne peut donc s'adresser qu'à une voire deux espèce-cibles, et en aucun cas à l'ensemble de la faune piscicole. Dans sa mise en œuvre, toute la difficulté réside dans le ciblage de la période de dévalaison.

Cette solution est en particulier envisagée pour l'anguille argentée. Cela implique soit d'arrêter les turbines durant toutes les nuits de la période de dévalaison (4 mois environ), soit de les arrêter uniquement lors des pics de migration, ce qui nécessite de pouvoir les prédire. Les investigations sur la prédiction des pics de migration n'ont à ce jour pas donné de résultats opérationnels (Gosset et al, 2002, Subra et al, 2005, 2007, 2008). Dans le cadre du programme national R&D anguille, des expérimentations sont en cours sur la prédiction des pics de migration, soit à l'aide de « biomoniteurs » tels que le Migromat[®], soit à l'aide de modèles prenant en compte les paramètres environnementaux susceptibles de déclencher les dévalaisons (débit, température, turbidité, météorologie, ...).

3.2. Les turbines « ichtyocompatibles »

Le développement de turbines « ichtyocompatibles », c'est-à-dire de turbines n'induisant pas ou très peu de dommages sur les poissons, est relativement récent et toujours en cours pour certaines. On peut notamment citer :

- la turbine ichtyophile[®] VLH développée en France par la société MJ2¹³, s'adressant à des sites disposant d'une hauteur de chute nette comprise entre 1.4 et 2.8 m, voire plus, et d'un débit de 10 à 30 m³/s par groupe (puissance par groupe de 100 à 500 kW).

Les tests menés sur le prototype installé à Millau pour les smolts et les anguilles argentées ont donné des résultats prometteurs et ont permis d'identifier la cause probable des mortalités résiduelles (Lagarrigue et al, 2008). Dans le cadre du programme national R&D anguille, des modifications du manteau de la roue et de l'extrémité des pales sont à l'étude pour améliorer les taux de survie, la prochaine turbine modifiée installée devant être testée.

¹³ <http://www.vlh-turbine.com>.

- Les vis hydrodynamiques, développées notamment par la société Ritz-Atro¹⁴, s'adressant à des débits d'environ 0.5 à 5.5 m³/s pour des chutes entre 1 et 10 m (puissances jusqu'à 300 kW).

Des tests réalisés au Royaume-Uni et supervisés par l'Environment Agency montrent que cette vis n'induit que très peu, voire aucun dommage à la dévalaison des smolts, kelts et anguilles notamment (Fishtek, 2007 et 2008). Lors de l'installation de ces vis, il faut néanmoins veiller au respect de certains critères : interstice faible entre la vis et son manteau (quelques millimètres), surface du manteau de la vis lisse et arrête amont de la vis recouverte d'un caoutchouc.

- la turbine « fish-friendly » hélicoïdale à 3 pales, développée par le laboratoire Alden dans le cadre du projet Advanced Hydropower Turbine System Program¹⁵, lancé en 1994 par le US Department of Energy, l'EPRI et le Hydropower Research Foundation. Cette turbine est à ce jour prévue pour fonctionner avec des chutes de l'ordre de 20-30 m et un débit de l'ordre de 30 m³/s.

Les tests biologiques sur un modèle réduit de turbine « fish-friendly » sont concluants (Hecker et Cook, 2005). Le programme actuellement poursuivi est d'optimiser le rendement énergétique de cette turbine et de construire une turbine échelle 1 qui fera l'objet de tests biologiques in situ.

Les turbines ichtyocompatibles représentent une solution très intéressante car a priori efficace pour l'ensemble de la faune piscicole. En effet, une turbine n'induisant pas ou très peu de dommages sur les smolts et les anguilles – deux espèces particulièrement sensibles pour différentes raisons – devrait également se révéler peu dommageable sur les autres espèces.

La mise en place de turbines ichtyocompatibles est une solution envisageable en particulier au niveau des nouveaux aménagements hydroélectriques. Sur les centrales existantes, le changement de turbine avec les éventuelles modifications de génie civil peut s'avérer plus difficile.

3.3. Dispositifs de capture – transport des poissons

La solution de la capture des poissons dévalant à l'amont d'un aménagement et leur transport à l'aval n'est envisageable qu'à partir du moment où il est techniquement et financièrement possible d'installer un dispositif capable de capturer une fraction conséquente de la population (pêcheur, dispositif de piégeage), compte tenu du fait que les dévalaisons de smolts ou d'anguilles argentées se déroulent généralement sur des coups d'eau.

Cette solution peut s'avérer intéressante lorsqu'elle permet de by-passer plusieurs aménagements en chaîne sur un cours d'eau. Deux opérations de ce type sont par exemple en cours pour les smolts de saumon atlantique et de truite de mer depuis 1996 sur la Garonne (aménagements de Pointis et Camon) et pour l'anguille depuis 2006 sur la rivière Shannon en Irlande (Killaloe).

3.4. Les barrières comportementales

Il s'agit de dispositifs induisant le déplacement des poissons dans une direction donnée grâce à divers stimuli agissant sur leur comportement (attraction, répulsion, guidage). Les stimuli visuels, auditifs, électriques et hydrodynamiques ont donné lieu à un grand nombre de barrières expérimentales : écran lumineux attractif ou répulsif, écran à bulles, écran sonore, écran à chaînes fixes ou mobiles, écrans hydrodynamiques (louvers et murs guideaux). Des résultats prometteurs ont été obtenus sur un certain nombre d'écrans expérimentaux en laboratoire ou sur des sites tests. Cependant les évaluations portant sur les installations grandeur réelle sont peu nombreuses et les quelques résultats se sont révélés très variables, le plus souvent beaucoup moins encourageants que ceux obtenus dans des conditions contrôlées (EPRI, 1994, 2001a ; Gosset et Travade, 1999). L'efficacité des barrières comportementales se révèle très sensible aux conditions de milieu (turbidité,

¹⁴ <http://www.ritz-atro.de>

¹⁵ <http://hydropower.inl.gov/turbines/index.shtml>.

bruit ambiant et surtout conditions hydrauliques) et à la configuration des sites. Elle est de plus spécifique : c'est-à-dire qu'une barrière comportementale efficace pour une espèce, peut se révéler inefficace, voire contre-indiquée pour d'autres. Par exemple, la lumière exerce un effet attractif sur les juvéniles de salmonidés ou d'aloses et un effet répulsif sur les anguilles. Il convient donc de rester très prudent dans l'intention d'utiliser les barrières comportementales d'autant que les fabricants, industriels ou représentants de ce type de matériel ont un intérêt évident dans la vente ou l'utilisation de leur technologie, et peuvent être considérés comme ayant un jugement très subjectif sur le degré d'efficacité et les limites d'utilisation de leur produits (Larinier et Travade, 2002).

Jusqu'à présent, seuls certains écrans hydrodynamiques ont démontré une efficacité significative au niveau de prises d'eau de centrales hydroélectriques. Les efficacités des louvers testés sur les juvéniles de salmonidés varient de 50% à 90% (ASCE, 1995 ; EPRI, 2001b ; Amaral, 2003). Ces écrans sont cependant très sensibles au colmatage et nécessitent des dispositifs de nettoyage et des grilles grossières de protection en amont. Ils sont également encombrants étant donné leurs faibles angles d'orientation par rapport à la direction de l'écoulement (10° à 30°).

Pour les espèces qui dévalent dans les premiers mètres sous la surface (salmonidés, clupéidés), un mur guideau de surface disposé de biais par rapport à l'écoulement peut être utilisé pour guider les poissons vers un exutoire. Un tel dispositif a été testé au niveau de la centrale de Bellows Falls sur la rivière Connecticut. Le masque vertical est orienté à 40° par rapport à l'axe du canal d'aménée et descend à mi-profondeur (4.5 m). Son efficacité sur les smolts de saumon atlantique a été évaluée à 84% (Odeh et Orvis, 1998). Un tel dispositif est en cours d'installation à la centrale de Tuilières sur la Dordogne. Un mur guideau, que ce soit de fond ou de surface, n'est par contre pas envisageable pour l'anguille qui dévale à proximité du fond mais qui explore toute la hauteur d'eau lorsqu'elle rencontre un obstacle.

La société Profish a récemment proposé pour l'anguille un système de répulseurs par infrason (Sand et al, 2000 ; Sonny et al, 2006). Dans le cadre du programme national R&D anguille, cette barrière comportementale sera testée en 2008 et 2009 au niveau des prises d'eau des centrales de Baigts et de Biron sur le Gave de Pau.

3.5. Les barrières physiques (grilles fines)

L'installation de barrières physiques (grilles à barreaux, grilles à mailles rectangulaires, ou plaques perforées) est une solution depuis longtemps préconisée au niveau des prises d'eau, en particulier en Ecosse (Aitken et al 1966) ou aux USA (NMFS, 1997 ; ASCE, 1995) pour les juvéniles de salmonidés. Cette solution se révèle très efficace pour arrêter les poissons et éviter leur passage par la prise d'eau, l'espacement des barreaux, la taille des mailles ou des perforations étant fonction des poissons à exclure. Dans la conception des premières barrières physiques, les aspects de guidage des poissons vers un exutoire n'étaient par contre pas considérés, ce qui peut causer des retards importants à la migration, éventuellement préjudiciables pour la survie des poissons.

Les prises d'eau « ichtyocompatibles » sont définies comme les dispositifs de grille fine permettant non seulement d'arrêter les poissons, mais également de les guider vers une voie de passage sûre (exutoire). Leur installation impose cependant certaines contraintes sur les dimensions des prises d'eau pour respecter les critères biologiques. D'autre part, les grilles fines présentant généralement des espacements libres entre les barreaux réduits par rapport à un plan de grille conventionnel, cela pose les questions des pertes de charge et de l'entretien (dégrillage), la quantité de corps arrêtés par la grille étant accrue. **L'objet de ce rapport est de définir les bases de conception et de dimensionnement des prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques (débits turbinés jusqu'à 150-200 m³/s), en prenant en compte à la fois la dévalaison des différentes espèces piscicoles et les contraintes d'exploitation et de maintenance (perte de charge, dégrillage).**

A noter que les différentes solutions évoquées ci dessus ne permettent de limiter, voire d'éviter dans le cas d'une efficacité totale, que les dommages liés au passage par les turbines, et ce généralement pour certaines espèces-cibles seulement. Les éventuels impacts liés à la présence des retenues (retards de migration, défauts d'orientation, prédatons accrues) ne font pas l'objet de cette étude.

4. LES DIFFERENTS DISPOSITIFS DE GRILLES FINES

Dans cette partie, on passe en revue les différents dispositifs de grilles fines existants selon leur type de grille, leur implantation ou leur intégration dans les prises d'eau hydroélectriques, afin de dégager le ou les types de dispositif les plus à même de satisfaire à la fois aux contraintes liées à la dévalaison des poissons et aux contraintes d'exploitation.

Le retour d'expérience acquis porte essentiellement sur les smolts de saumons et de truites de mer. Il n'y a pas ou très peu de retour d'expérience sur la dévalaison de l'anguille argentée, des juvéniles d'aloses ou de lamproies, ainsi que sur celle des espèces potamodromes.

4.1. Grilles « Eicher »

Les grilles « Eicher » consistent en des panneaux de grille à barreaux de section triangulaire de 2 mm espacés de 2 mm, installés dans une conduite circulaire d'amenée d'eau vers les turbines avec une inclinaison en coupe importante (de 10° à 30°) de manière à déflécter les poissons vers un bypass (Figure 1 ; Eicher, 1985, EPRI, 1987). L'avantage principal de ce dispositif est de fonctionner avec des vitesses d'approche très élevées (jusqu'à 2 m/s). La forte inclinaison du plan de grille par rapport à l'écoulement permet de maintenir des vitesses normales assez faibles (de l'ordre de 0.45 m/s) et de très fortes vitesses tangentielles (de l'ordre de 1,5 m/s). Des taux de déflexion de 99% et des taux de survie supérieurs à 90% ont été obtenus sur des alevins et smolts de saumon du Pacifique de plusieurs espèces (Winchell et al, 1993). Les barreaux doivent être parfaitement lisses pour ne pas provoquer d'écaillage ou de blessure sur les poissons glissant le long du plan de grille. Le taux de blessure augmente avec le colmatage. Ce type de grille montée sur pivot pour adopter une position de nettoyage s'est révélé pratiquement autonettoyant. Le faible coût de construction et le faible encombrement sont deux avantages. Par contre, le désavantage principal est la perte de charge induite, jusqu'à 0.6 m (Winchell et al, 1993 ; ASCE, 1995). A notre connaissance, seules trois grilles Eicher ont été installées de manière opérationnelle (Sullivan Hydro Plant sur la rivière Illamette dans l'Oregon, Elwha Hydroelectric Project sur la rivière Elwha dans l'état de Washington et Puntledge Hydroelectric Project sur la rivière Puntledge en Colombie Britannique).

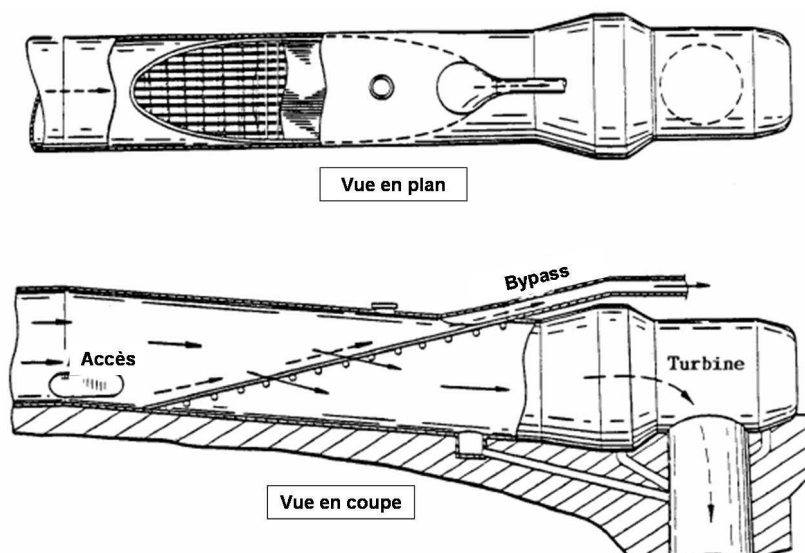


Figure 1 : Grille Eicher (d'après EPRI 1987).

4.2. Grilles "MIS" (Modular Inclined Screen)

L'EPRI (Electric Power Research Institute) a développé une barrière physique dérivée des grilles Eicher, mais destinée à être utilisée dans des ouvrages à surface libre (Taft et al, 1993). Ce dispositif se compose d'une entrée profilée comportant des grilles grossières, d'un panneau de grilles à barreaux de section triangulaire (espacement de 1.9 mm) incliné en coupe de 10° à 20° par rapport à l'écoulement de manière à déflécter les poissons vers un by-pass (Figure 2). Les grilles MIS sont montées sur pivot pour permettre leur nettoyage à contre-courant. Les évaluations biologiques avec 11 espèces de poissons (5 espèces de salmonidés, 2 clupéidés et 4 espèces potamodromes) ont montré hormis pour les clupéidés des taux de déflexions supérieurs à 95% et des taux de survie supérieurs à 92%, ceci jusqu'à des vitesses d'approche voisines de 2.5 m/s (Taft et al, 1993). Malgré ces résultats prometteurs, le nombre de réalisations s'est révélé très limité, une seule à notre connaissance (Green Island Hydroelectric Project sur la rivière Hudson).

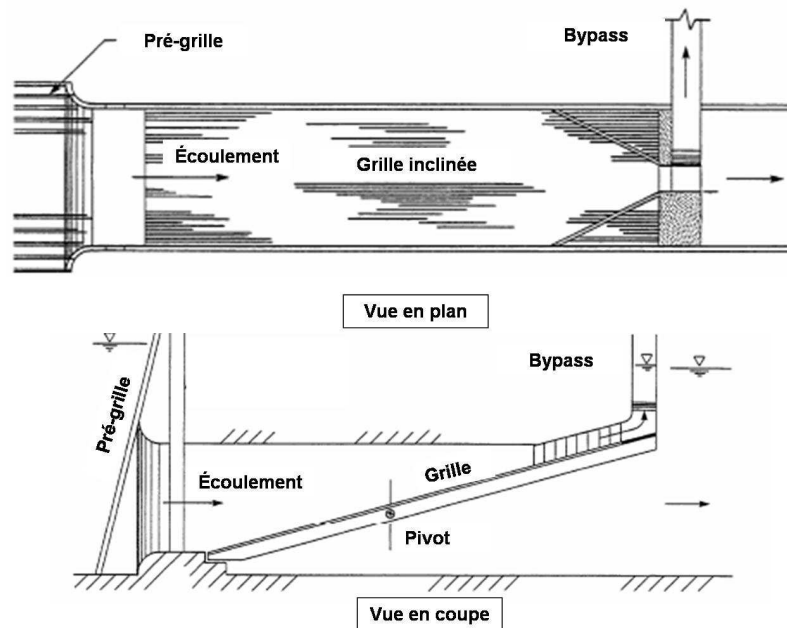


Figure 2 : Grille MIS (d'après EPRI, 1994).

4.3. Tambours rotatifs

Des tambours rotatifs autonettoyants sont couramment utilisés sur la cote Ouest des USA sur les prises d'eau pour l'irrigation dans le bassin de la rivière Yakima (Washington) avec des débits pouvant atteindre 57 m³/s (Nietzel et al, 1991) et au niveau de prises d'eau de centrales hydroélectriques jusqu'à environ 85 m³/s (ASCE, 1995). Ce dispositif nécessite l'installation de pré-grille grossière. Il ne supporte que de faibles variations du niveau amont ; la hauteur d'eau devant être comprise entre 0.7 et 0.85 fois le diamètre des cylindres de façon à ce que l'autonettoyage s'effectue efficacement. Les dimensions des tambours existants varient de 45 cm de diamètre et 90 cm de longueur, à près de 6 m de diamètre et 7 m de longueur. Les tambours sont généralement constitués de grillage en fil d'acier inoxydable (mailles carrées de 3.2 mm). L'axe des tambours, disposé sur les premières prises d'eau perpendiculairement à la direction de l'écoulement, est maintenant orienté en plan avec un angle de 26° par rapport à la direction de l'écoulement dans le canal de prise pour améliorer le guidage du poisson.

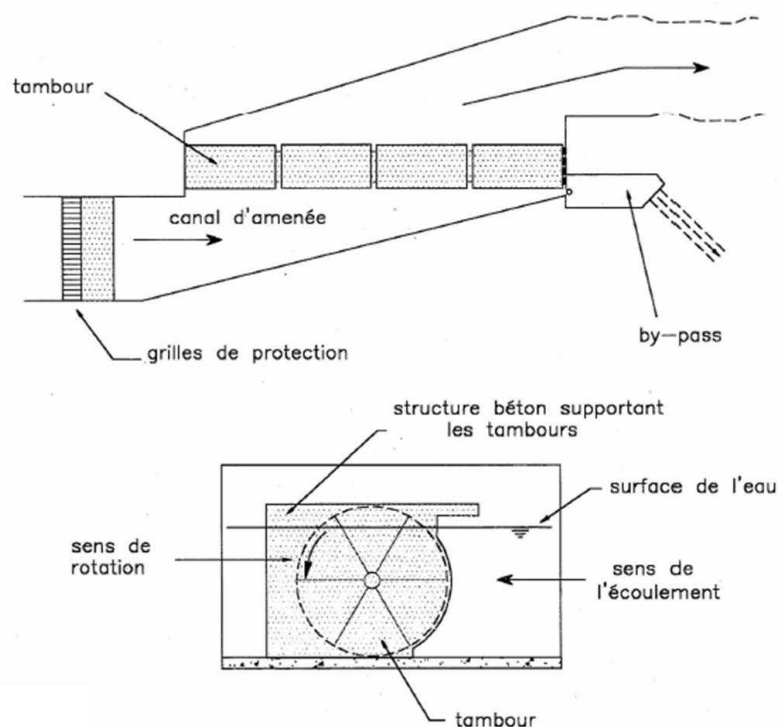


Figure 3 : Tambours rotatifs (figure extraite de Larinier et Travade, 2002)

4.4. Exutoires de surface associés aux grilles de prises d'eau existantes

En France, comme ailleurs, la plupart des aménagements hydroélectriques ont été construits avant que les problèmes liés à la migration de dévalaison aient été perçus. L'installation de barrières physiques sur ces ouvrages obligerait à redimensionner la plupart des prises d'eau, ou tout au moins à modifier les plans de grilles, de façon à réduire les vitesses d'écoulement et augmenter les surfaces de filtration. Devant cette difficulté, on s'est orienté dans un premier temps, pour les juvéniles de saumon et de truite de mer vers l'utilisation d'exutoires de surface associés aux grilles existantes. En effet, les grilles de protection des prises d'eau existantes, situées sur la plupart des installations en surface, peuvent se comporter comme des barrières physiques pour les individus de grande taille (adultes en dévalaison), et, dans certaines conditions, comme des barrières comportementales pour les juvéniles, qui éprouvent une certaine répulsion à passer au travers.

Des expérimentations ont été effectuées en France sur plusieurs sites dans le but de quantifier l'efficacité et dégager les limites de ces dispositifs, ainsi que de définir les critères d'implantation et de dimensionnement des exutoires (Larinier et Travade, 1996 ; Chanseau et al, 1999 ; Croze et al, 1999, 2001 ; Croze et Larinier 1999 ; Travade et al, 1999 ; Travade et Larinier 2006). Ces études ont montré que le degré d'efficacité de ces dispositifs dépendait étroitement d'une répulsivité suffisante des grilles et de l'existence d'un champ de vitesse à l'amont immédiat des grilles permettant le stationnement du poisson un laps de temps suffisant et son guidage en direction de l'exutoire.

Pour les juvéniles de salmonidés une certaine répulsivité des grilles a été observée, lors des différentes expérimentations pour des espacements variant de 2,5 cm à 4 cm (soit environ 1/6 à 1/4 de la longueur du poisson). Cet effet répulsif semble ensuite rapidement diminuer lorsque l'espacement entre barreaux augmente : pour des espacements de l'ordre de 6 à 7 cm, la grille devient très perméable aux juvéniles de salmonidés, tout au moins en l'absence d'une composante tangentielle très marquée.

L'efficacité de l'exutoire est d'autant meilleure qu'il existe une vitesse tangentielle au plan de grille marquée, permettant de guider les poissons vers l'exutoire. Les plans de grille conventionnels étant généralement disposés perpendiculairement à l'axe du canal, l'existence de cette composante

tangentielle est alors lié à une dissymétrie des conditions d'écoulement à l'approche de la prise d'eau qui peut être induite par un changement de direction ou de section du canal d'amenée pouvant se situer bien en amont.

L'efficacité de l'exutoire dépend non seulement de son implantation et du débit qui y est délivré, mais également des conditions hydrodynamiques, tant à proximité de l'entrée que dans l'exutoire lui-même. La zone d'influence de l'exutoire peut être considérablement réduite par l'existence de courants ascendants susceptibles d'en masquer l'entrée. Il est possible dans certains cas de réduire l'impact de ces ascendances en disposant des grilles de tranquillisation ou des plaques horizontales à l'amont immédiat de l'entrée : sur les sites de Soeix (Larinier et Travade, 1996) et Camon (Croze et al, 1999), l'amélioration de l'écoulement dans le voisinage immédiat de l'entrée de l'exutoire a permis de faire passer l'efficacité du dispositif de 15-35% à 60-75%.

Les résultats obtenus lors de contrôle de ce type de dispositifs en France font apparaître des efficacités très variables pour les smolts de saumon atlantique, comprises entre 55-85% lorsque le guidage est effectif et l'exutoire implanté à proximité de la zone de concentration des poissons, et 10-30% dans le cas où le guidage du poisson est insuffisant, l'exutoire mal situé par rapport à la zone de concentration des poissons, et/ou l'espacement des grilles relativement importants (> 5 cm) (Travade et Larinier 2006).

L'association d'exutoires de surface aux grilles de prises d'eau existantes n'est donc pas une solution suffisamment efficace pour être utilisée de façon systématique pour les smolts de saumon atlantique et de truite de mer. Cette solution se révèle d'autre part peu efficace pour les anguilles qui franchissent aisément le plan de grille dès lors que celui-ci ne constitue pas une barrière physique ; ce qui est le cas de la plupart des plans de grille conventionnels (Gosset et al, 2002 ; Subra et al, 2005, 2007 et 2008 ; Bau et al, 2008).

4.5. Plans de grilles orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement (USA)

Un plan de grilles orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement est actuellement le dispositif le plus communément installé au niveau des prises d'eau de petite et moyenne importance sur les cours d'eau à migrateurs de la cote nord-est des USA. Cada et Sale (1993) dénombrent un total de 32 centrales comportant de telles grilles dans les 8 états du Nord-Est, la plus grosse prise d'eau étant à la centrale d'Hudson Falls sur la rivière Hudson (débit maximum turbiné de 227 m³/s). Le USFWS¹⁶ recommande une orientation à 45° au maximum par rapport à l'écoulement, un espacement maximum entre les barreaux de 2.5 cm (basé sur les juvéniles de salmonidés) et une vitesse normale maximale de 0.6 m/s, vitesse prise à 30 cm en amont des grilles. Le débit transitant par l'exutoire est généralement compris entre 2% et 5% du débit turbiné (Steve Patch¹⁷ com. Pers.).

Les dispositifs construits selon ces critères ont généralement démontré de bonnes, voire très bonnes efficacités sur les juvéniles de salmonidés. Lors de l'expérimentation menée à la centrale Wadhams (débit maximum turbiné de 4.25 m³/s) sur la rivière Boquet, parmi les 30 smolts de saumons radiomarqués ayant dévalé, aucun n'est passé au travers le plan de grille, 18 sont passés par l'exutoire transitant jusqu'à 0.45 m³/s (jusqu'à 10% du débit maximum turbiné) et 12 sont passés par les déversoirs (Nettles and Gloss, 1987). Lors de l'expérimentation menée à la centrale de Pine Valley (débit maximum turbiné de 8.5 m³/s) sur la rivière Souhegan, une étude par marquage – recapture indique une efficacité du dispositif de 97% sur les smolts de saumon atlantique (Charles Ritzi Associates, 1993). Lors de l'expérimentation menée à la centrale Lower Saranac (débit maximum turbiné de 48 m³/s) sur la rivière Saranac, parmi les 29 smolts de saumons radiomarqués ayant dévalé, 28 (97%) sont passés par l'exutoire de surface transitant 1.4 m³/s (2.9% du débit maximum turbiné) et 1 (3%) par la passe de montaison. Aucun n'est passé à travers le plan de grille (Simmons, 2000).

¹⁶ USFWS : US Fish and Wildlife Service.

¹⁷ USFWS Biologist at New York Field Office.

Le retour d'expérience sur l'efficacité des plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement pour les anguilles est encore très faible. Les tests en canal expérimental sur l'anguille américaine (*Anguilla rostrata*) aboutissent à des efficacités de guidage croissantes avec l'orientation : de 55-70% avec une orientation à 45°, à 80-95% avec une orientation à 15° (EPRI, 2001b). Ces efficacités sont à considérer avec prudence, car elles sont partiellement imputables à la faible largeur du canal ainsi qu'à la position idéale de l'exutoire, en bout de grille sur toute la profondeur. L'efficacité du dispositif de dévalaison installé au niveau de la centrale Stillwater (débit maximum turbiné 147 m³/s) a été évaluée par la mise en place périodique de filets dans le by-pass et devant l'entrée des turbines. Le dispositif consiste en un plan de grille d'espacement 2.5 cm, orienté à 45° par rapport à la direction de l'écoulement et associé à l'ouverture d'une vanne de fond de 3 m de large transitant au minimum environ 3 m³/s (2.0% du débit maximum turbiné). Durant la période d'échantillonnage, 26 anguilles, de taille supérieure ou égale à 63 cm, ont été capturées dans le by-pass et aucune à l'entrée des turbines, suggérant qu'un tel dispositif peut être efficace pour l'anguille américaine (Barnes-Williams, 1998).

L'efficacité des plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement pour les espèces potamodromes est encore peu documentée. Lors de l'expérimentation menée à la centrale d'Hudson Falls sur la rivière Hudson (Ichthyological Associates 1999), parmi les 154 poissons radiopistés (7 espèces différentes), 35 (23%) ont dévalé, dont 18 sont passés par l'exutoire transitant 5.2 m³/s (2.3% du débit maximum turbiné), 12 par les déversoirs, 2 au travers les grilles et par les turbines ; pour 3 poissons, la voie de passage n'a pas pu être déterminée. Les poissons localisés à l'entrée de l'exutoire l'ont pratiquement tous emprunté à la première incursion. Ces résultats suggèrent qu'un tel dispositif peut également être efficace pour les espèces potamodromes.

5. PRINCIPES DES PRISES D'EAU « ICTHYOCOMPATIBLES »

Les prises d'eau « ichtyocompatibles » sont définies comme les dispositifs de grilles fines associés à un ou plusieurs exutoires permettant assurer les trois fonctions fondamentales suivantes :

- l'arrêt des poissons, les empêchant ainsi de passer par les turbines,
- le guidage vers un système de transfert à l'aval,
- et le transfert à l'aval de l'aménagement sans dommage.

Le retour d'expérience acquis notamment en France sur l'association d'exutoires aux plans de grille conventionnels montre qu'il est rarement possible d'obtenir de très bonnes efficacités, à l'exception de certains cas particuliers où les conditions sont particulièrement favorables (pouvoir répulsif du plan de grille, existence d'un courant tangentiel, exutoire positionné à proximité de la zone d'accumulation des poissons). Il apparaît ainsi qu'un dispositif satisfaisant au mieux à la fois aux contraintes liées à la dévalaison et aux contraintes d'exploitation hydroélectrique peut être obtenu en adaptant les plans de grille conventionnels pour qu'ils assurent de manière efficace l'arrêt et le guidage des poissons vers un ou plusieurs exutoires. Les plans de grille orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement installés sur les cours d'eau à migrateurs de la cote nord-est des USA en sont un bon exemple. Une seconde configuration, inspirée des grilles de type Eicher ou MIS, avec un plan de grille très incliné en coupe par rapport à l'horizontale, peut également s'avérer intéressante.

Au final, deux configurations de prise d'eau « ichtyocompatible » sont envisageables :

- soit un **plan de grille quasi-vertical et orienté en plan d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement** ; l'exutoire est alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille (Figure 4). Lorsque la longueur du plan de grille devient importante, des exutoires intermédiaires peuvent être installés.
- soit un **plan de grille très incliné en coupe d'un angle β par rapport à l'horizontale** et disposé perpendiculairement à l'écoulement ; le ou les exutoires selon la largeur de la prise d'eau sont alors positionnés au sommet du plan de grille (Figure 5).

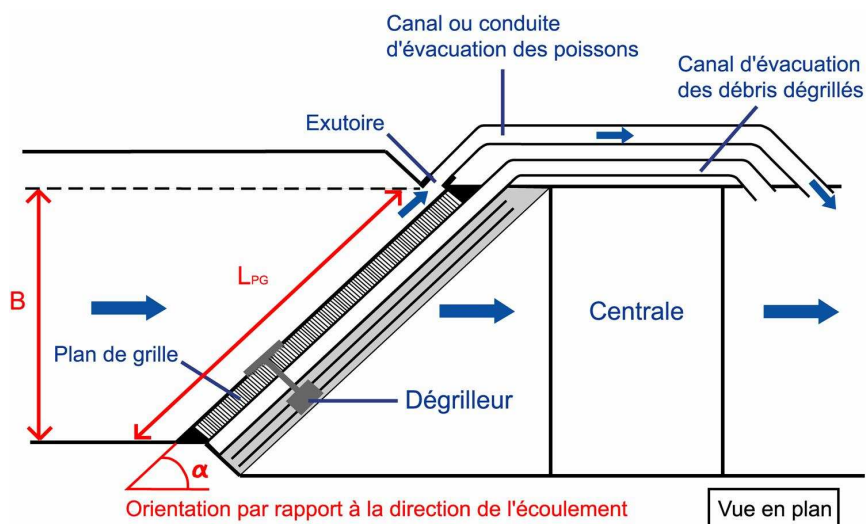


Figure 4 : Représentation schématique d'un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement (vue en plan).

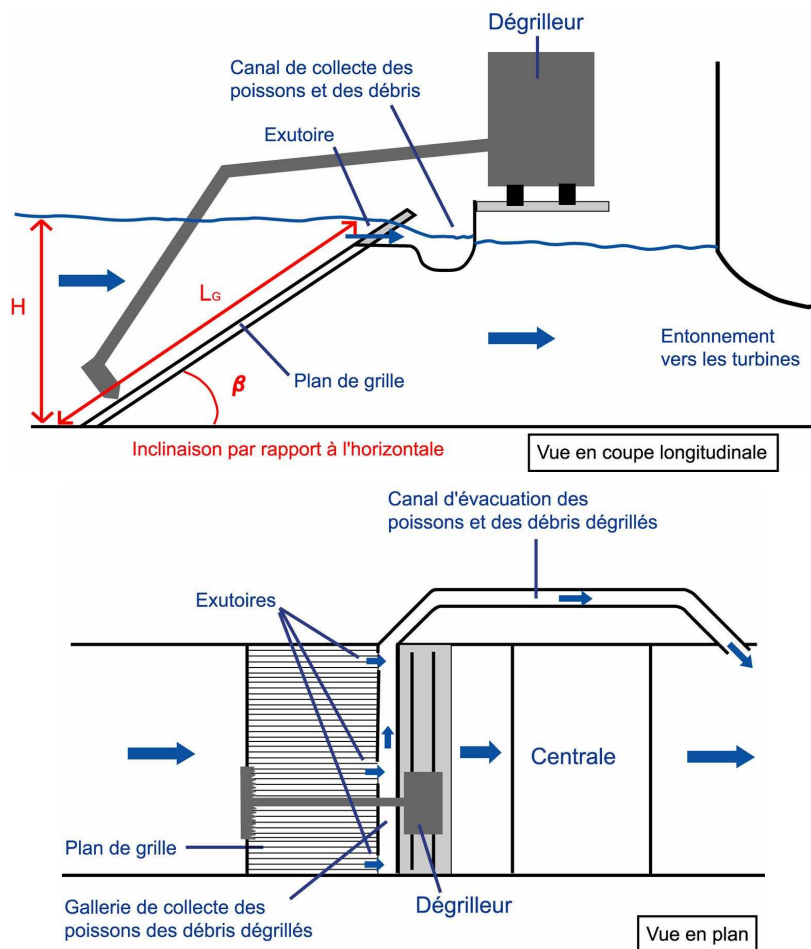


Figure 5 : Représentation schématique d'un plan de grille incliné en coupe par rapport à l'horizontale (vue en coupe longitudinale et vue en plan).

Dans le cas d'un plan de grille orienté en plan, l'angle d'orientation α est l'angle aigu entre le plan de grille et la direction de l'écoulement, souvent considérée parallèle à la berge. Un angle α de 90° correspond à un plan de grille perpendiculaire à la direction en plan de l'écoulement.

Dans le cas d'un plan de grille incliné en coupe, l'angle d'inclinaison β est l'angle aigu entre le plan de grille et le fond du canal. En toute rigueur, il faudrait considérer l'inclinaison du plan de grille par rapport à la direction en coupe de l'écoulement. En pratique, celle-ci est considérée parallèle au fond du canal, lui-même généralement quasi-horizontale. Un angle β de 90° correspond à un plan de grille perpendiculaire au fond du canal.

L'orientation ou l'inclinaison sont ainsi d'autant plus prononcées que les angles α ou β sont faibles.

Le dimensionnement d'une prise d'eau ichtyocompatible consiste à déterminer :

- l'espacement libre entre les barreaux interdisant le passage du poisson à travers le plan de grille,
- la vitesse normale aux grilles évitant le placage du poisson contre les grilles et limitant les pertes de charges,
- l'angle d'orientation ou d'inclinaison (α , β) assurant un guidage efficace du poisson,
- et les caractéristiques du ou des exutoires et du système de transferts permettant d'acheminer le poisson à l'aval sans dommage.

On abordera successivement dans la suite les quatre points précédents.

6. ARRET DES POISSONS

6.1. Espacement libre entre les barreaux des grilles

Une grille constitue une barrière physique pour un poisson tant que l'espacement libre entre les barreaux e est inférieur à la largeur du poisson W . La largeur d'un poisson W est couramment exprimée en fonction de sa longueur L et de son rapport de forme du corps K :

$$W = K \times L$$

Le rapport de forme du corps K est fonction de la morphologie de chaque espèce, bien qu'il puisse varier quelque peu parmi les poissons d'une même espèce selon les conditions de nutrition.

6.1.1. Smolts de saumon atlantique et de truite de mer

Les smolts éprouvent une certaine réticence à passer au travers un plan de grille même s'il ne constitue pas une barrière physique, le pouvoir répulsif du plan de grille diminuant cependant rapidement au fur et à mesure que l'espacement augmente (Larinier et Travade, 2002). Un plan de grille peut ainsi constituer une barrière comportementale efficace comme le prouve les résultats obtenus en France sur certaines prises d'eau équipées de grille fine (Travade et Larinier, 2006) ou aux USA avec les plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement avec un espacement de 2.5 cm (voir paragraphe 4.5).

Pour constituer une barrière physique pour l'ensemble des smolts, le rapport de forme du corps des salmonidés ayant été évalué à environ 0.10 (Hoefler et Riedmueller, 1996, dans DWA, 2005), il faut adopter des espacements libres entre les barreaux de l'ordre de 1.2 – 1.5 cm selon les caractéristiques des populations.

De façon générale, on peut donc préconiser d'adopter un **espacement libre maximal entre les barreaux de 2.5 cm pour les smolts de saumon atlantique et de truite de mer** (barrière comportementale). Le recours à des espacements inférieurs constituant une barrière physique (jusqu'à 1.2 – 1.5 cm) peut néanmoins se justifier pour obtenir une efficacité maximale du dispositif de dévalaison lorsque les mortalités au passage par les turbines sont totales ou très importantes (aménagement de haute chute notamment).

6.1.2. Anguilles argentées

Les observations en canal expérimental (Adam et al, 1999 ; EPRI, 2001b) et les suivis au niveau de prise d'eau de centrales (Gosset et al, 2002 ; Subra et al, 2005, 2007 et 2008 ; Bau et al, 2008) ont montré que l'anguille a un comportement très différent des juvéniles de salmonidés. L'effet comportemental répulsif des grilles est nettement moins marqué sur cette espèce. Les anguilles ont tendance à aller au contact de la grille, voire à forcer le passage au travers. Seule une barrière physique semble en mesure de les arrêter efficacement.

Le corps d'une anguille étant souple, elle ne peut être physiquement bloquée au niveau d'une grille que par sa tête. Pour la fixation de l'espacement libre maximal entre les barreaux pour l'anguille, Adam et al (1999) recommandent suite à différentes observations de prendre en compte un rapport de forme (largeur de tête / longueur du corps) égal à 0.03 (recommandation reprise dans DWA 2005). La biométrie sur les 579 anguilles argentées utilisées dans le cadre des expérimentations menées sur le Gave de Pau donne des résultats concordants : environ 90% des anguilles présentent un rapport (largeur de tête / longueur du corps) supérieur à 0.03, la médiane et la moyenne étant de l'ordre de 0.36 (Figure 6, données tirées de Subra et al, 2005, 2007, 2008 et de Bau et al, 2008).

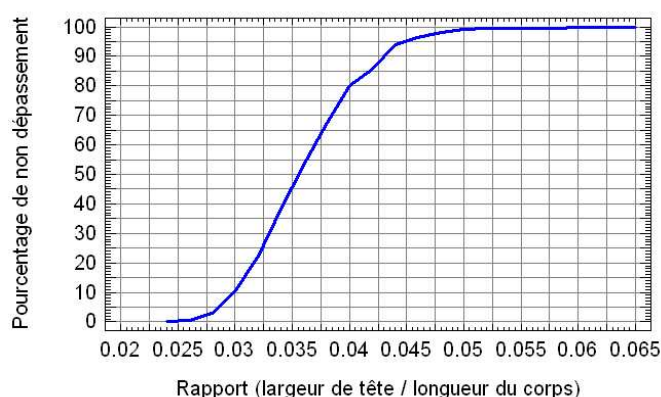


Figure 6 : Courbe classée des valeurs des rapports (largeur de tête / longueur du corps) à partir des 579 anguilles argentées utilisées dans le cadre des expérimentations menées sur le Gave de Pau.

L'espacement libre maximal à adopter sera fonction des caractéristiques de la population d'anguilles en amont de l'aménagement (taille des individus dévalant, sex ratio). Constituer une barrière physique pour les plus petits individus dévalant (petits mâles de 30-40 cm) nécessite d'avoir recours à un espacement de l'ordre de 1.0 cm. Il apparaît toutefois qu'une grille avec un espacement libre de 1.5 cm constitue déjà une barrière physique pour la moitié des anguilles mesurant entre 40 et 50 cm et pour pratiquement tous les individus de plus de 50 cm. De même, une grille avec un espacement libre de 2.0 cm constitue une barrière physique pour plus d'un quart des anguilles mesurant entre 50 et 60 cm et pour tous les individus de plus de 60 cm (Figure 7).

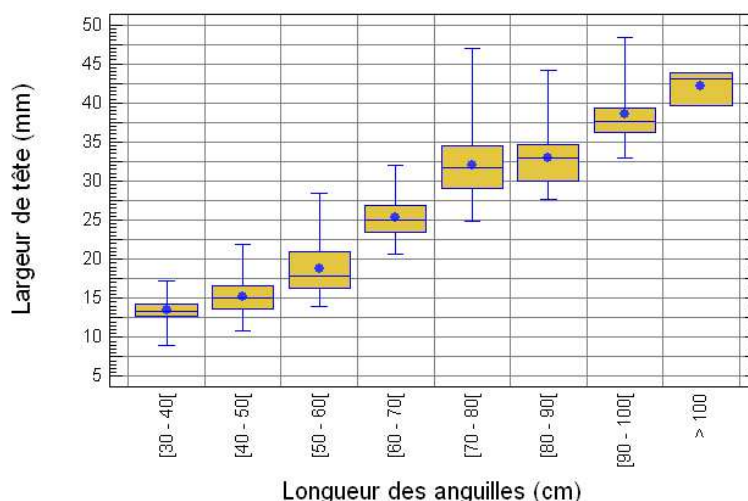


Figure 7 : Boîtes de dispersion¹⁸ des largeurs de tête d'anguille par classe de taille (échantillon des 579 anguilles argentées utilisées dans le cadre des expérimentations menées sur le Gave de Pau).

Les plus petites anguilles (généralement des mâles) subissant des mortalités moindres au passage par les turbines que les gros individus, on peut envisager une protection incomplète de cette frange de la population et ainsi préconiser **d'adopter pour les anguilles un espacement libre maximal entre les barreaux de l'ordre de 1.5 – 2.0 cm**. Avec de tels espacements, on peut tout de même espérer une certaine efficacité sur les petites anguilles en comptant sur un certain effet comportemental répulsif du plan de grille.

Les préconisations sur l'espacement libre maximal entre les barreaux sont susceptibles de s'affiner au regard des résultats des expérimentations futures, en particulier pour l'anguille.

¹⁸ Les boîtes de dispersion présentent la moyenne des valeurs (point bleu), la médiane (trait au sein de la boîte jaune), le premier et le troisième quartile (extrémités de la boîte) et l'étendue des données (minimum et maximum aux extrémités de la droite bleu).

6.2. Capacité de nage des poissons et plan de grille

A l'approche d'un plan de grille, les vitesses d'écoulement doivent permettre aux poissons de nager le temps nécessaire à la découverte du ou des exutoires et ne pas induire de mortalité par placage contre la grille si elle constitue une barrière physique ou ne pas provoquer le passage prématuré des poissons au travers la grille si elle constitue une barrière comportementale.

Dans le cas où la vitesse normale au plan de grille est inférieure ou égale à sa vitesse de croisière, le poisson peut se maintenir très longtemps devant le plan de grille sans se fatiguer. Il ne risque donc pas de se faire plaquer avant de dévaler par un exutoire ou de repartir plus en amont.

Dans le cas où la vitesse normale au plan de grille est supérieure à sa vitesse de croisière, le poisson ne peut alors se maintenir qu'un certain temps devant le plan de grille. Il se fatigue progressivement et risque de se faire plaquer, et ce d'autant plus rapidement que la vitesse normale excède sa vitesse de croisière. Le poisson doit donc trouver sur sa trajectoire un exutoire lui permettant de dévaler dans une durée limitée qui est fonction de son endurance.

Limiter la vitesse normale à une valeur inférieure ou égale à la vitesse de croisière des poissons permet d'éviter que les dispositifs soient sélectifs vis-à-vis des performances de nage des individus. Cette démarche conservatoire permet également de limiter les problèmes lorsque les paramètres physico-chimiques (température de l'eau, oxygénation) réduisent les capacités de nage des poissons.

Pour estimer la limite supérieure de la vitesse de croisière U_{CR} (en m/s) en fonction de la longueur L (en m) du poisson, Videler (1993) propose la relation suivante basée sur la compilation de résultats expérimentaux obtenus sur des poissons (salmonidés, cyprinidés et clupéidés) de taille entre 5 et 55 cm :

$$U_{CR} = 0.15 + 2.4 \times L$$

Cette limite correspond un peu arbitrairement à la vitesse que peuvent soutenir les poissons pendant 200 min. On obtient notamment pour des juvéniles de salmonidés de 15 cm une vitesse de croisière de l'ordre de 50 cm/s, soit environ 3.3 BL/s (Body Length per second : vitesse en longueur de corps par seconde). Cela amène donc à préconiser une **vitesse normale au plan de grille maximale de l'ordre de 50 cm/s pour les juvéniles (smolts) de salmonidés**. Cette valeur est supérieure à celle longtemps préconisée, en particulier en Ecosse (Aitken et al, 1966 ; Solomon, 1992), à partir de l'évaluation de la vitesse de croisière à 2 BL/s, soit 30 cm/s pour des smolts de 15 cm. A présent, l'Environment Agency préconise au Royaume-Uni une vitesse normale maximale de 75 cm/s (O'Keeffe et Turnpenny, 2005), en se basant sur les résultats de Peake et McKinley (1998). Cette dernière valeur paraît élevée. Les vitesses de croisière obtenues par Peake et McKinley (1998) par des tests à vitesses constantes pendant 200 minutes sont similaires aux vitesses soutenues obtenues par des tests à vitesses croissantes par paliers de 2 à 10 minutes. Cela amène à s'interroger sur la représentativité de ces expérimentations pour la détermination d'un critère sur la vitesse normale maximale, et ce d'autant plus que l'étude ne porte que sur une population de smolts (Indian River in North-central Newfoundland, Canada) et que les vitesses de croisière annoncées par ces auteurs (99 cm/s minima pour des smolts de 12 à 17 cm, soit de 5.8 à 8.2 BL/s) sont nettement supérieures à celles annoncées par ailleurs : 76 cm/s pour des smolts de pisciculture d'environ 24 cm (soit 3.2 BL/s) selon Kutty et Saunders (1973, cité dans Peake et McKinley, 1998) et 50 cm/s pour des smolts sauvages d'environ 16 cm (soit 3.1 BL/s) selon Virtanen et Frosman (1987). Au final, la valeur de vitesse de croisière de 50 cm/s donnée par la formule de Videler (1993) pour des poissons de 15 cm et préconisée comme vitesse normale maximale semble réaliste. Cette valeur est par ailleurs proche de celle recommandée par le USFWS sur la cote Est des USA (60 cm/s).

Les capacités de nage des anguilles argentées en dévalaison ne sont pas précisément évaluées. Toutefois, les observations de Adams et al (1999) et de Schultze (1999, dans EPRI, 2001a) sur le comportement d'**anguilles** face au plan de grille et leur placage amène à préconiser pour cette espèce une **vitesse normale maximale de 50 cm/s**.

La vitesse normale maximale admissible V_N détermine la surface minimale de grille pour un débit donné. Le colmatage partiel de la grille et l'augmentation des vitesses normales qui en résulte doivent être pris en compte lors du dimensionnement par un coefficient de sécurité, de façon à toujours respecter le critère biologique.

7. GUIDAGE DES POISSONS

Le guidage des poissons est obtenu en disposant le plan de grille de biais par rapport à la direction générale de l'écoulement. Deux configurations sont possibles :

- Un plan de grille quasi-vertical et orienté en plan d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement, souvent considérée parallèle à la berge.
- Un plan de grille très incliné en coupe d'un angle β par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à l'écoulement.

7.1. Aspects hydrauliques

L'inclinaison ou l'orientation du plan de grille crée un écoulement tangentiel au plan de grille permettant le guidage des poissons vers l'aval. La vitesse d'approche V_A peut se décomposer en une composante normale V_N perpendiculaire au plan de grille et une composante tangentielle V_T parallèle au plan de grille (Figure 8).

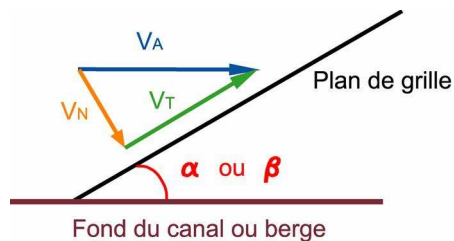


Figure 8 : Décomposition de la vitesse d'approche V_A en vitesse normale V_N et vitesse tangentielle V_T .

On a alors : $V_N = V_A \times \sin\alpha$ et $V_T = V_A \times \cos\alpha$ (de même avec β)

On a porté sur la Figure 9 l'évolution des rapports V_A/V_N , V_A/V_T et V_T/V_N en fonction de l'angle d'inclinaison ou d'orientation de la grille par rapport à la direction générale de l'écoulement amont. Pour une vitesse d'approche donnée, les composantes tangentielles et normales respectivement augmentent et diminuent avec l'inclinaison du plan de grille. La vitesse tangentielle est nulle pour un plan de grille normal à la direction de l'écoulement (angle de 90°). Elle est inférieure à la vitesse normale tant que l'angle demeure supérieur à 45° , égale pour un angle de 45° , et devient respectivement 1.5, 2, et 3 fois supérieure pour des angles de 33° , 26° , et 18° .

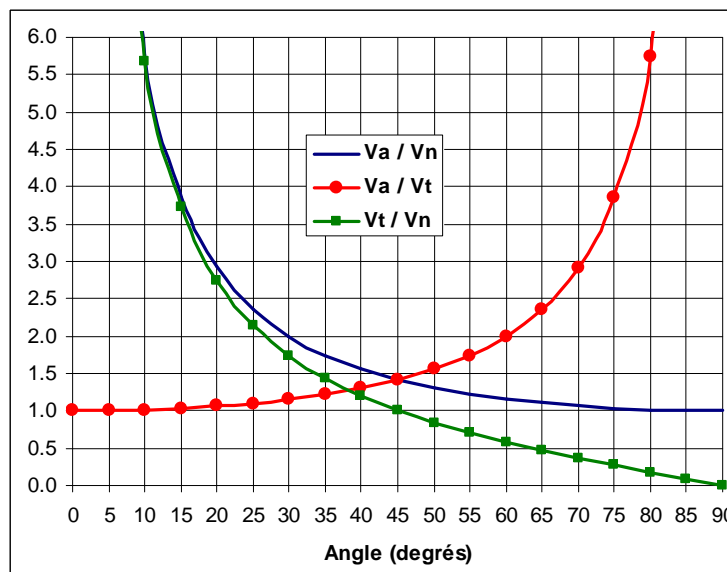


Figure 9 : Evolution des rapports des vitesses V_A / V_N , V_A / V_T et V_T / V_N en fonction de l'angle d'inclinaison ou d'orientation.

La longueur L_{PG} d'un plan de grille orienté d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement au niveau d'une prise d'eau de largeur B augmente avec l'orientation (Figure 10). Il en va de même pour la longueur de grille L_G d'un plan de grille incliné d'un angle β par rapport à l'horizontale au niveau d'une prise d'eau de profondeur H .

$$L_{PG} = \frac{B}{\sin\alpha} \quad \text{et} \quad L_G = \frac{H}{\sin\beta}$$

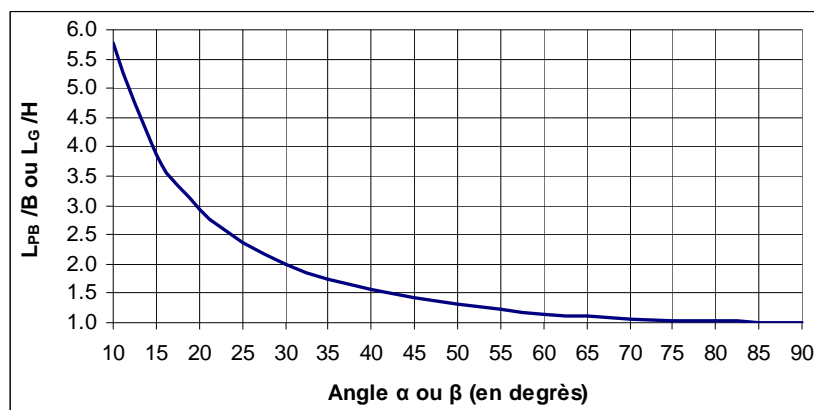


Figure 10 : Evolution du rapport L_{PG} / B ou L_G / H en fonction de l'angle d'orientation ou d'inclinaison.

7.2. Aspects biologiques

D'une manière générale, le guidage des poissons sera d'autant meilleur que la vitesse tangentielle est importante, en valeur et par rapport à la vitesse normale, et donc que les angles α ou β sont faibles (EPRI, 2001b). La vitesse tangentielle peut être supérieure à la vitesse de croisière des poissons. L'efficacité d'un plan de grille pour guider les poissons est étroitement liée à l'espacement des barreaux, ainsi qu'au champ de vitesse à son approche. Le guidage sera d'autant meilleur que les vitesses d'approche sont homogènes (voir paragraphe 9.6).

Pour les plans de grille orientés en plan d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement, sur la cote Ouest des USA, le NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) préconise une vitesse tangentielle supérieure à la vitesse normale, ce qui est obtenu par un angle α inférieur à 45° (NMFS, 1997). Sur la cote Est, l'USFWS recommande également un angle d'orientation des plans de grille inférieur ou égal à 45° (Amaral, 2003). Dans cette configuration, les barreaux formant la grille sont eux-mêmes de biais par rapport à l'écoulement et produisent un effet « louver » répulsif. Sur la cote Ouest des USA, les cylindres rotatifs sur les prises d'eau d'irrigation sont installés à un angle de 26° pour obtenir une vitesse tangentielle deux fois supérieure à la vitesse normale (Nietzel et al, 1991). Généralement les louvers sont orientés à 10° - 20° pour obtenir une vitesse tangentielle au moins 3 fois supérieure à la vitesse normale et induire un effet hydrodynamique répulsif suffisant. **Dans le cas de plans de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement, compte tenu du retour d'expérience sur les dispositifs mis en place aux USA et des bonnes, voire très bonnes, efficacités obtenues, on peut préconiser un angle d'orientation α inférieur ou égal à 45° (vitesses tangentielles supérieures ou égales aux vitesses normales).**

Pour les plans de grilles inclinés en coupe d'un angle β par rapport à l'horizontale, les grilles de filtration à fortes vitesses de type Eicher ou MIS sont généralement installées avec des inclinaisons de l'ordre de 10° - 20° . Dans cette configuration, les barreaux formant la grille sont dans le sens de l'écoulement et ne produisent pas d'effet « louver ». **Dans le cas de plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale, compte tenu (1) du retour d'expérience sur les grilles à fortes vitesses de type Eicher ou MIS, (2) du fait qu'il n'y ait pas d'effet louver et (3) du fait que les poissons doivent obligatoirement passer en surface et sont donc amenés à changer de position dans la colonne d'eau, l'angle d'inclinaison doit être plus faible que dans la configuration précédente, on peut préconiser un angle d'inclinaison β inférieur ou égal à 26° (vitesses tangentielles au moins 2 fois supérieures aux vitesses normales).**

8. PASSAGE DES POISSONS VERS L'AVAL

8.1. Les exutoires de surface

8.1.1. Considérations générales

Les exutoires de surface se montrent efficaces sous certaines conditions pour les espèces dévalant dans les couches de surface et en particulier pour les juvéniles de salmonidés. Cette efficacité dépend de leur position par rapport au plan de grille, de l'hydrodynamique à leur entrée et du débit transité, ainsi que de l'efficacité préalable des systèmes d'arrêt et de guidage des poissons.

L'exutoire doit se situer à l'extrémité aval du système d'arrêt et de guidage, dans la zone où se concentrent généralement les poissons.

Les conditions hydrauliques à la liaison entre le plan de grille et l'exutoire et à l'entrée même de l'exutoire se révèlent primordiales pour son efficacité. À l'entrée de l'exutoire, l'écoulement ne doit pas être turbulent (pas de décollement) et l'accélération modérée. Il faut également veiller à ce que l'entrée d'un exutoire ne soit masquée ni par un contre-courant, ni par un courant ascendant. Il est préférable de contrôler le débit, non pas au niveau de l'entrée de l'exutoire, mais un peu plus en aval. Ce contrôle se fait par déversement de préférence au niveau d'un seuil épais profilé ou d'un clapet, les vannes plates induisant des gradients de vitesses intenses étant à éviter. La régulation du débit peut s'avérer nécessaire dans le cas de variations du niveau d'eau amont, pour éviter que l'exutoire ne soit périodiquement sous-alimenté (efficacité compromise) ou suralimenté (perte énergétique supplémentaire, difficultés éventuelles pour l'évacuation). La régulation s'effectue généralement de façon automatique par l'asservissement au niveau amont d'un seuil épais monté sur une vanne ou d'un clapet. La première solution permet de conserver des conditions optimales d'entonnement quel que soient les conditions. Les vitesses à l'entrée de l'exutoire peuvent être contrôlées en ajustant la section d'écoulement au niveau du fond ou sur la largeur de l'exutoire par un système d'aiguille.

Le débit transité doit être à l'échelle du débit maximal transitant par la prise d'eau, de l'ordre de 2% à 10% (Odeh et Orvis, 1998 ; Ferguson et al, 1998 ; Larinier et Travade, 2002). Le débit transité et la section de l'entrée de l'exutoire doivent être dimensionnés de façon à obtenir une vitesse à l'entrée de l'exutoire proche, voire légèrement supérieure à la vitesse tangentielle au plan de grille. La valeur minimale du débit de l'exutoire peut parfois être fixée par ses dimensions minimales (largeur et hauteur d'eau déversante), en particulier dans le cas des petites centrales. Afin de ne pas induire chez les poissons de réticences à emprunter l'exutoire, un minimum de 0.5 m est recommandé pour la largeur de l'exutoire et pour la hauteur d'eau (Larinier et Travade, 2002). Vis-à-vis de l'exploitation hydroélectrique, le débit de l'exutoire constitue une perte énergétique ; sa détermination représente donc un enjeu majeur. Dans le cas d'une centrale implantée en dérivation, on peut envisager soit d'installer le dispositif de dévalaison au niveau de la centrale, le débit de l'exutoire venant alors se rajouter au débit réservé délivré au barrage, soit d'installer le dispositif de dévalaison au niveau de la prise d'eau du canal d'amenée de façon à ce que le débit de dévalaison soit inclus dans le débit réservé. L'alimentation d'un exutoire peut éventuellement être modulée durant l'année, avec un débit plus élevé pendant les périodes de dévalaison des espèces-cibles présentes en amont et un débit plus faible en dehors de ces périodes.

Dans la mesure du possible, il est conseillé de prévoir une chute d'au moins 50-60 cm au sein du dispositif afin d'empêcher la sortie des poissons (ASCE, 1995).

Du fait de leur situation à l'extrémité aval du plan de grille, les exutoires et les dispositifs d'évacuation sont sensibles au colmatage. Pour limiter les problèmes, le mieux est de dimensionner le dispositif d'évacuation de façon à permettre le passage à l'aval des corps dérivants. A défaut, il convient d'installer une grille à barreaux à fort écartement (minimum de 20 cm) pour ne pas induire chez les poissons des réticences à passer au travers. Lorsque cela est possible, on a intérêt à intercaler cette grille grossière entre l'exutoire et le dispositif d'évacuation, à l'aval d'une chute empêchant la remontée des poissons. Sinon, cette grille grossière peut être installée à l'amont de l'exutoire. Comme pour tout dispositif de franchissement, un entretien périodique est nécessaire, en particulier lors de chaque crue (Larinier et Travade, 2002).

Les résultats récents obtenus sur l'attrait lumineux des salmonidés montrent qu'un éclairage continu faible (lampe à vapeur de mercure 50 W) permet d'augmenter significativement l'efficacité d'un exutoire de surface, une grande partie de leur dévalaison se déroulant la nuit (LOGRAMI, 2000, Croze et al, 2001). L'éclairage d'un exutoire ne peut cependant pas se substituer aux facteurs hydrodynamiques primordiaux pour garantir son efficacité.

8.1.2. Cas des plans de grille inclinés en coupe par rapport à l'horizontale

Dans le cas d'un plan de grille incliné en coupe par rapport à l'horizontale, l'exutoire consiste en une ouverture au sommet du plan de grille. L'idéal est que cette ouverture soit pratiquée sur toute la largeur du plan de grille. Cependant, la nécessité d'assurer à l'entrée de l'exutoire une hauteur d'eau suffisante et une vitesse proche, voire légèrement supérieure à la vitesse tangentielle au plan de grille se traduit alors par un débit conséquent. Le fait que le débit pour la dévalaison soit limité oblige à réduire la largeur des ouvertures. Dans cette configuration, les poissons ne sont pas guidés sur la largeur de la grille (pas de vitesses transversales a priori). Le transit d'une part du débit par l'exutoire induit toutefois localement à son approche des vitesses transversales. Ces dernières peuvent être quelque peu accentuées en obstruant la partie supérieure de la grille. Lorsque la largeur du plan de grille est importante, il devient nécessaire d'implanter plusieurs exutoires, devant alors se situer préférentiellement sur les cotés du plan de grille (Figure 11). On peut envisager soit deux goulottes distinctes pour l'évacuation des poissons et des dégrillats, soit une goulotte commune pour les deux, le débit alloué à la dévalaison servant également à l'évacuation des dégrillats qui ne peuvent alors pas être retirés du cours d'eau (Figure 12). Dans ce dernier cas, il faut nécessairement positionner un exutoire à l'extrémité amont de la goulotte. Le contrôle du débit doit se faire de préférence à la sortie de la galerie de collecte, éventuellement à l'aide d'un clapet que l'on peut abaisser complètement si besoin pour évacuer les dégrillats. Dans le cas de deux goulottes distinctes, s'il est nécessaire d'installer un grille grossière pour limiter les problèmes de colmatage de l'exutoire et du dispositif d'évacuation, celle-ci peut être implantée dans le prolongement du plan de grille et de la tôle de raccordement de façon à profiter du nettoyage par le dégrilleur. Dans tous les cas, la galerie de collecte doit permettre l'évacuation sans problème des corps amenés à transiter par les exutoires.

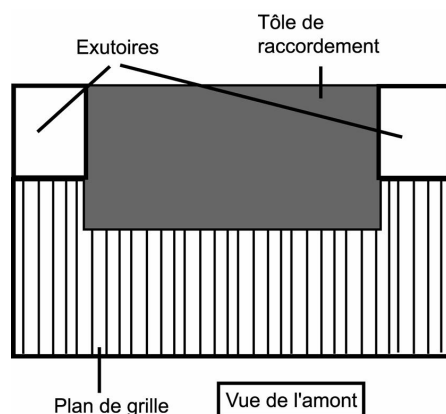


Figure 11 : Vue de face de deux exutoires de surface au niveau d'un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale.

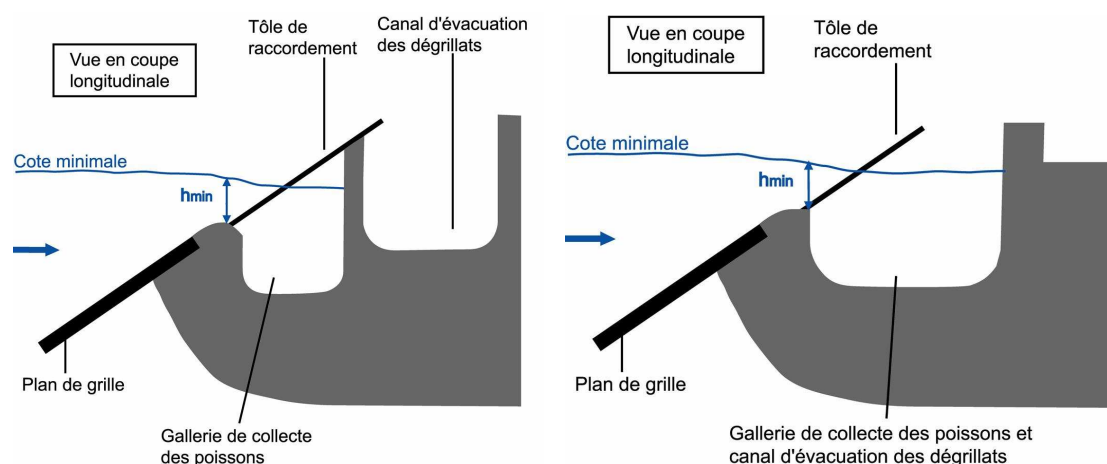


Figure 12 : Vue en coupe longitudinale d'un exutoire de surface au niveau d'un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale, avec deux canaux d'évacuation des poissons et des dégrillats (à gauche) ou un canal commun (à droite).

8.1.3. Cas des plans de grille orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement

Dans le cas d'un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement, l'exutoire consiste en une échancrure ouverte dans la berge. L'idéal serait que cette ouverture soit pratiquée sur toute la profondeur du plan de grille. Cependant, la nécessité d'assurer à l'entrée de l'exutoire une hauteur d'eau suffisante et une vitesse proche, voire légèrement supérieure à la vitesse tangentielle au plan de grille, et le fait que le débit pour la dévalaison soit limité obligent à réduire la profondeur de l'échancrure. Pour que l'écoulement ne soit pas turbulent et l'accélération progressive, les parois latérales doivent être dans la mesure du possible profilées et la remontée du fond progressive (Figure 13). Dans le cadre de l'étude du dispositif de dévalaison à la centrale de Pointis (Garonne), les essais sur modèle réduit ont permis de proposer un profil longitudinal de seuil épais permettant d'obtenir une accélération progressive des vitesses d'écoulement (Chorda et Larinier 1996 ; voir en Annexe 1).

Dans le cas d'un plan de grille très long, il peut être envisagé d'implanter des exutoires intermédiaires. L'ASCE recommande dans ce cas de mettre en place une courte paroi de guidage (Figure 14). Une attention particulière doit alors être portée au risque de colmatage de l'exutoire intermédiaire, qui peut être aggravé par la mise en place de la paroi de guidage, et ce d'autant plus que les poissons sont généralement évacués via une conduite susceptible de s'obstruer.

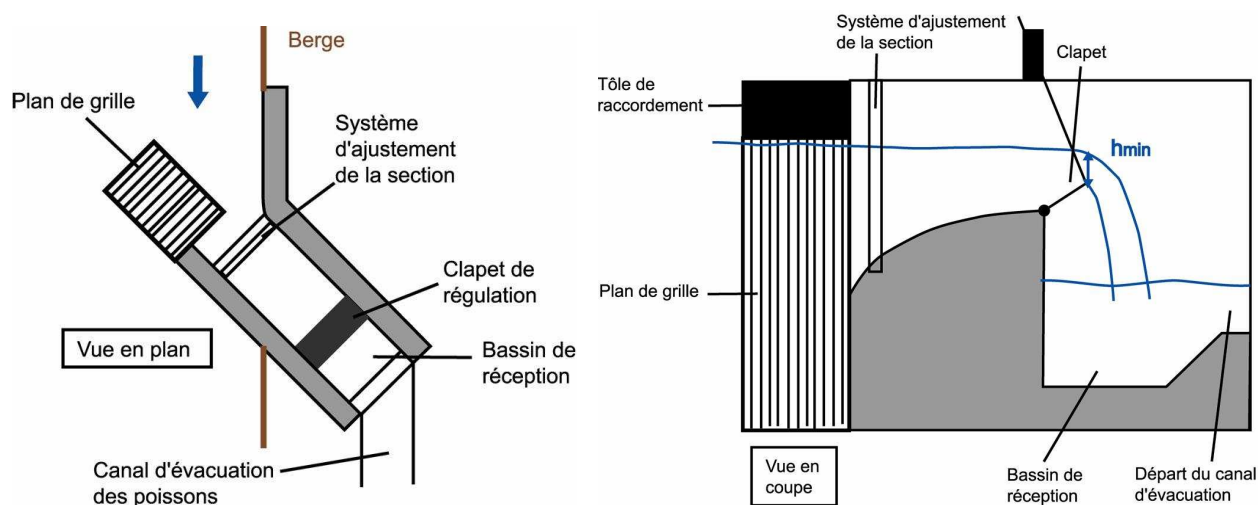


Figure 13 : Vue en plan (à gauche) et en coupe (à droite) d'un exutoire de surface terminal au niveau d'un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement.

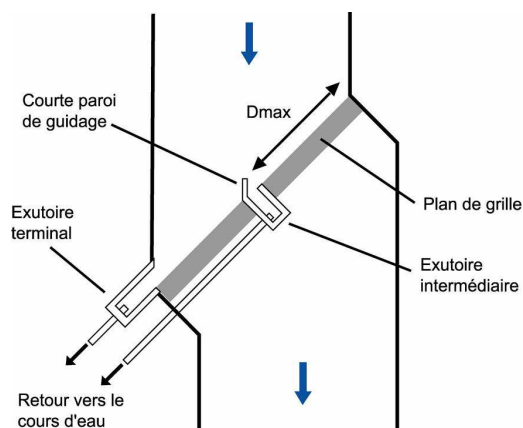


Figure 14 : Représentation schématique d'un exutoire intermédiaire au sein d'un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement (d'après ASCE 1995).

8.2. Les exutoires de fond

Des exutoires de fond peuvent être mis en place pour les espèces benthiques et en particulier l'anguille. Ce type d'exutoire n'apparaît cependant pas utile au niveau des plans de grille inclinés en coupe par rapport à l'horizontale, les poissons étant guidés du fond vers les exutoires de surface par les vitesses tangentielles. A l'inverse, cela peut s'avérer utile au niveau de plans de grille orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement, les poissons n'étant pas guidés vers la surface. Deux configurations sont envisageables :

- Une solution consiste à prolonger l'ouverture d'un exutoire de surface jusqu'au fond. La remontée du fond jusqu'à la crête déversante doit alors être en pente douce. Cette solution est recommandée, mais n'est envisageable qu'au niveau des prises d'eau de faibles profondeurs. Cela nécessite de disposer de débits importants dans l'exutoire de façon à conserver des vitesses suffisantes à son entrée.
- Une ouverture au fond avec un moine et un déversement en surface peut être mise en place (Figure 15). Le débit peut être contrôlé par un clapet au niveau du déversement de surface et les vitesses à l'entrée de l'exutoire par ajustement de la section de l'ouverture au fond. Le moine doit de préférence être démontable pour permettre un entretien approfondi. Cette solution permet de mettre en place un exutoire à une profondeur importante.

Les critères concernant le débit transitant par l'exutoire et les dimensions minimales de l'exutoire sont identiques à ceux données pour les exutoires de surface.

Le peu de retour d'expérience acquis sur l'installation d'ouverture de fond aboutit à des résultats contrastés (Gosset et al, 2002 ; Subra et al 2007). Cela laisse penser qu'il peut y avoir un intérêt à installer une ouverture de fond pour les anguilles, mais qu'un gain par rapport à un exutoire de surface ne peut être obtenu que sous certaines conditions. Les prises d'eau avec un plan de grille se prolongeant jusqu'au fond de la retenue semblent notamment plus propices, l'ouverture pouvant alors se situer à proximité à la fois du pied de grille et du fond.

On peut toutefois s'interroger sur l'opportunité d'installer une ouverture de fond compte tenu des éventuels problèmes d'entretien et du fait que les expérimentations récentes montrent que lorsque les anguilles sont efficacement arrêtées, elles prospectent la prise d'eau sur toute la hauteur d'eau jusqu'en surface. Les anguilles semblent alors capables de trouver une autre voie de passage ou d'attendre des périodes de déversement au niveau des ouvrages évacuateurs pour dévaler ((Haro et al, 2000 ; Boubée et Williams 2006 ; EPRI 2007 ; Subra et al, 2008 ; Bau et al, 2008). Les premiers suivis tridimensionnels du comportement des anguilles montrent à présent bien qu'elles prospectent toute la hauteur d'eau jusqu'en surface, en particulier au voisinage du plan de grille (Brown 2005, Brown et al. 2007 a et b).

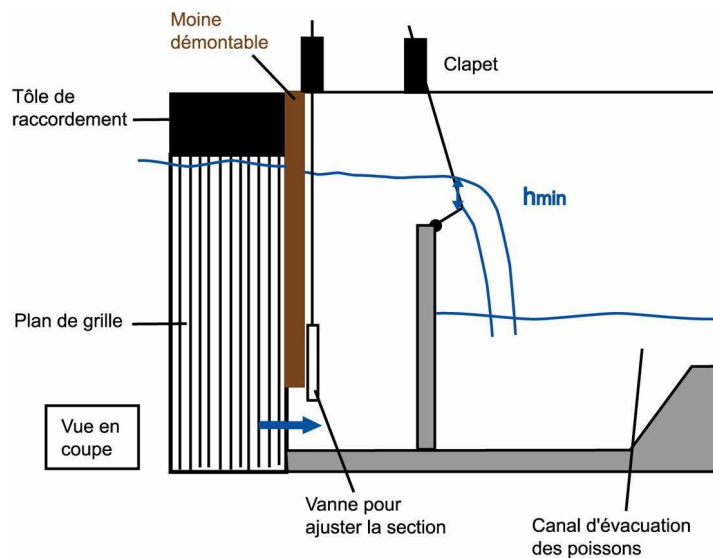


Figure 15 : Vue en coupe d'un exutoire de fond avec la mise en place d'un moine.

8.3. Le dispositif d'évacuation vers l'aval

Après passage dans l'exutoire, les poissons doivent être transférés sans dommage à l'aval de l'aménagement. Le principe est de restituer le poisson par l'intermédiaire d'une conduite ou d'un canal ouvert qui contourne la centrale et se jette dans le canal de fuite. Les canaux ouverts sont préférables dans la mesure où ils sont beaucoup moins sujets aux obstructions et d'un entretien plus facile. L'écoulement dans les conduites doit si possible rester à surface libre afin d'éviter les impacts potentiels des variations de pression sur les poissons. Conduites et canaux peuvent être de formes et de sections très variables selon la configuration des sites et les débits à transiter. Sur la cote Est des USA, l'USFWS préconise pour les conduites un diamètre minimum de l'ordre de 60 cm et un rayon de courbure minimum de 3 m (Amaral 2003). Les surfaces intérieures et les raccords doivent être lisses pour éviter l'écaillage des poissons. Les dimensions et les rayons de courbure des coudes doivent être suffisants pour limiter les risques de colmatage par les débris. Les vitesses dans l'ouvrage et au point d'impact dans le bief aval doivent rester inférieures à une dizaine de m/s, certains organismes préconisant même de ne pas dépasser 7-8 m/s (ASCE 1995). Le débouché de la conduite ou du canal ne doit pas être noyé. La hauteur de chute entre le débouché et le plan d'eau ne doit pas dépasser une douzaine de mètres pour éviter tout risque de blessures des poissons à l'impact, quels que soient leur taille et leur mode de chute (chute libre ou chute dans la veine d'eau) (Larinier et Travade 2002). Le rejet doit également se faire dans une zone d'une profondeur suffisante pour éviter tout risque de blessure par choc mécanique. Odeh et Orvis (1998) préconisent une profondeur minimale de l'ordre du quart de la chute, avec un minimum d'environ 1 m.

Sur les gros aménagements où le débit dans l'exutoire est important (plusieurs m^3/s , voire dizaines de m^3/s), il est possible de concentrer les poissons dans un plus faible débit à l'aide d'une grille inclinée qui évacue latéralement ou par en dessous une partie du débit. Ceci permet de limiter les sections de l'ouvrage d'évacuation des poissons et de récupérer éventuellement une partie du débit pour le recycler par pompage (ASCE 1995). Les grilles inclinées sont en général des grilles à barreaux triangulaires (les grilles à fil soudé, de type « Johnson », plus lisses, sont préférables), le clair entre barreaux dépendant des espèces considérées : pour les smolts de saumon atlantique, on choisit des écartements de barreaux inférieurs ou égaux à 1 cm et une porosité de grille de l'ordre de 50%.

On a intérêt à assurer une dispersion du jet en sortie d'ouvrage pour limiter les cisaillements et la pénétration du jet trop profondément dans le bassin de dissipation aval. Bleyker et al (1997) présentent un dispositif pour disperser le jet à la sortie des conduites d'évacuation définie à partir d'une étude sur modèle réduit d'une conduite d'évacuation de diamètre intérieur D de 2.3 m transitant

entre 8 et 16 m³/s (Figure 16). Cette géométrie permet d'élargir le jet et de réduire sa profondeur de pénétration, tout en maintenant une hauteur d'eau suffisante et un écoulement torrentiel dans la conduite. Un tel dispositif peut également être envisagé à la sortie d'un canal.

Il convient aussi d'éviter de rejeter les poissons dans une zone d'eau morte ou à trop faible vitesse, dans laquelle les prédateurs sont susceptibles de se concentrer.

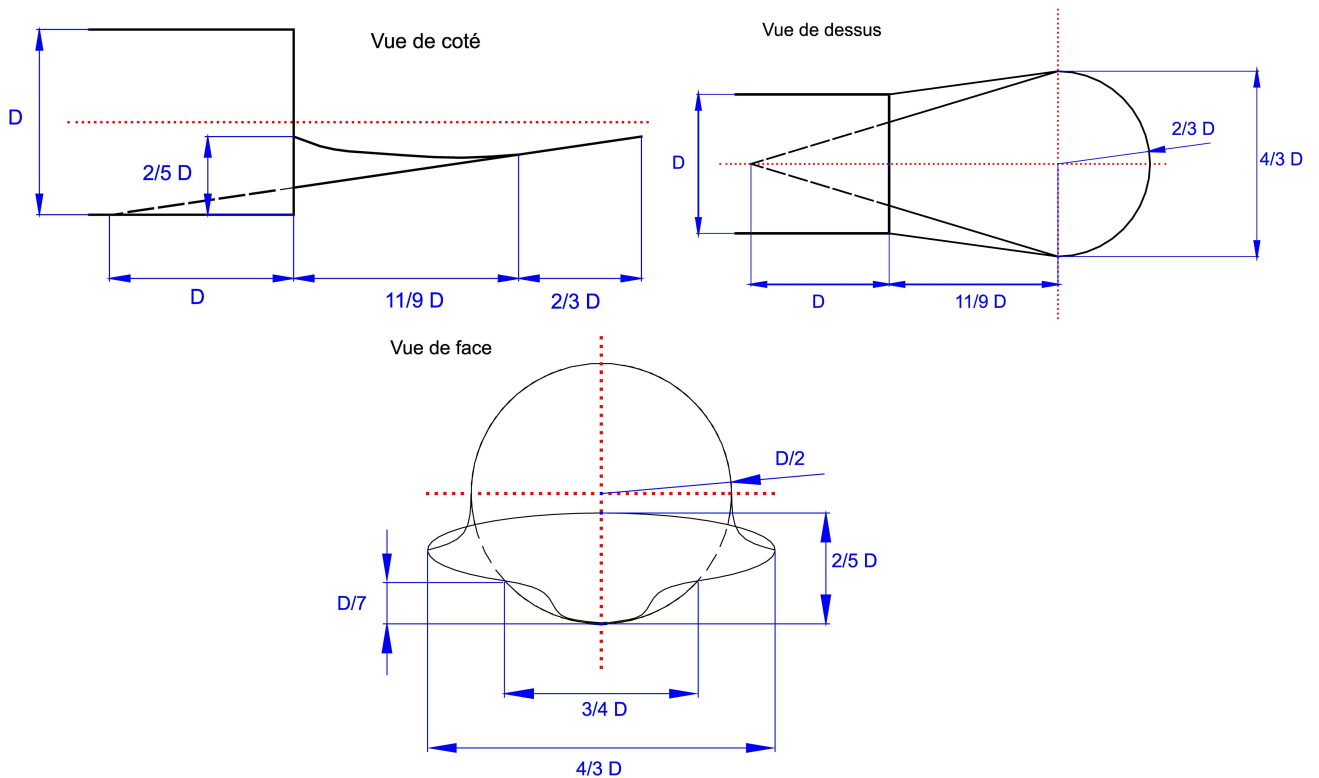


Figure 16 : Dispositif de dispersion du jet à la sortie d'une conduite, d'après Bleyker et al (1997).

Les aspects hydrauliques dans les dispositifs de dévalaison (notamment le contrôle du débit par déversement et son évacuation via un canal ou une conduite) sont abordés en Annexe 1.

9. ASPECTS HYDRAULIQUES DES PLANS DE GRILLE

Les préconisations liées à la dévalaison des poissons concernant les espacements libres entre les barreaux, généralement réduits par rapport à un plan de grille conventionnel, et les angles d'inclinaison ou d'orientation ont des répercussions sur l'hydraulique des plans de grille et notamment sur les pertes de charge. C'est pourquoi on s'intéresse dans cette partie à différents aspects liés à l'hydraulique des plans de grille.

9.1. Assemblage des plans de grille

Les grilles sont classiquement construites à partir de barreaux en acier. Pour assembler la grille, les barreaux peuvent être soudés dans les évidements d'un peigne perpendiculaire formant entretoise ; ils peuvent également être percés et enfilés alternativement avec des entretoises sur des tiges filetées (Figure 17). Le mode d'assemblage par soudure facilite la fabrication de la grille (pas de perçage des barreaux, découpage laser des peignes) et accroît les possibilités de pénétration des dents du dégrilleur, l'arête amont des peignes étant plus reculée. En contrepartie, ce mode d'assemblage présente un risque significatif de dégradation de type fissuration par fatigue. En effet, toute grille de prise d'eau est soumise à des vibrations dues aux irrégularités d'écoulement et par la mise en résonance des panneaux excités par les tourbillons alternés qui prennent naissance sur le bord de fuite des barreaux (tourbillons de Von Karman). L'espacement entre les barreaux est déterminé par les entretoises. Le pied de la grille est maintenu au fond dans une rainure (réservation dans le génie civil). La dernière entretoise en partie supérieure est positionnée de manière à permettre le raccordement d'une tôle sur laquelle on traînera les dégrillats jusqu'à la goulotte d'évacuation. Une grille peut être réalisée en une seule pièce ou en plusieurs panneaux. Le plan de grille vient généralement s'appuyer sur des pannes transversales scellées dans les parois latérales qui rigidifient l'ensemble. En 2007, l'ordre de grandeur moyen du prix d'un plan de grille est de 4-5 € par kg d'acier employé, ce coût étant très dépendant de la valeur de la matière première.



Figure 17 : Modes d'assemblage d'un plan de grille (Notice VIRY).

Certains constructeurs¹⁹ proposent des plans de grille en plastique (polymère de polyéthylène). Ce matériau permet une réduction de l'ordre de 75% du poids de la grille, n'est pas sujet à corrosion et limite la formation de givre. (Pankratz 1995).

9.2. Evaluation des pertes de charge au passage d'un plan de grille

9.2.1. Formule de perte de charge de Kirschmer-Mosonyi

Plusieurs formules ont été mises au point pour calculer les pertes de charge d'un écoulement occasionnées au passage à travers une grille. La formule de Kirschmer (1926) complétée par Mosonyi (1966) fait partie des plus couramment utilisées (ASCE, 1995 ; Meusburger, 2002).

Les pertes de charge ΔH (m) sont calculées en fonction d'un coefficient K_α fonction de l'orientation du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement (angle α), d'un coefficient de forme des barreaux K_F , du rapport entre l'épaisseur des barreaux d et l'espacement libre entre barreaux e , de l'inclinaison en coupe du plan de grille par rapport à l'horizontale (angle β) et de la vitesse d'approche V_A (m/s) :

$$\Delta H = K_\alpha \times K_F \times \left(\frac{d}{e}\right)^{4/3} \times \sin\beta \times \frac{V_A^2}{2g}$$

¹⁹ Dont notamment Structure Guard Inc, USA, www.structureguard.com.

Avec g l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

La vitesse d'approche moyenne V_A est égale la vitesse débitante de la prise d'eau obtenue en divisant le débit de la prise d'eau Q (m^3/s) par l'aire de la section totale d'écoulement A (m^2) :

$$V_A = Q/A$$

Les vitesses d'approche des plans de grille existants au niveau des centrales hydroélectriques sont généralement comprises entre 0.5 et 1.5 m/s (ASCE, 1995). Les pertes de charge sont d'autant plus importantes que la vitesse d'approche est élevée.

Le coefficient K_α prend en compte l'influence de l'orientation du plan de grille (angle α) par rapport à la direction de l'écoulement. Il a été déterminé à partir de mesure in situ effectuées sur des centrales par Mosonyi (1966). La valeur du coefficient K_α est fonction de l'angle α et du rapport entre l'épaisseur des barreaux d et l'espacement libre entre barreaux e (Tableau 1, Figure 18). Dans le cas d'un plan de grille disposé perpendiculairement à l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$), le coefficient K_α est égal à 1. Dès que le plan de grille est orienté par rapport à la direction de l'écoulement ($\alpha < 90^\circ$), le coefficient K_α est d'autant plus élevé que l'angle α et le rapport d/e sont faibles, un espacement de barreaux réduit permettant un meilleur guidage de l'écoulement.

Angle α (degrés)	Rapport entre l'épaisseur des barreaux et l'espacement libre entre les barreaux (d/e)								
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
80	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.14	1.50
70	1.14	1.16	1.18	1.21	1.24	1.26	1.31	1.43	2.25
60	1.25	1.28	1.31	1.35	1.44	1.50	1.64	1.90	3.60
50	1.43	1.48	1.55	1.64	1.75	1.88	2.10	2.56	5.70
40	1.75	1.85	1.96	2.10	2.30	2.60	3.00	3.80	-
30	2.25	2.41	2.62	2.90	3.26	3.74	4.40	6.05	-

Tableau 1 : Valeur du coefficient K_α selon l'angle α (degrés) et le rapport entre l'épaisseur des barreaux et l'espacement libre entre les barreaux (d/e), d'après Mosonyi (1966).

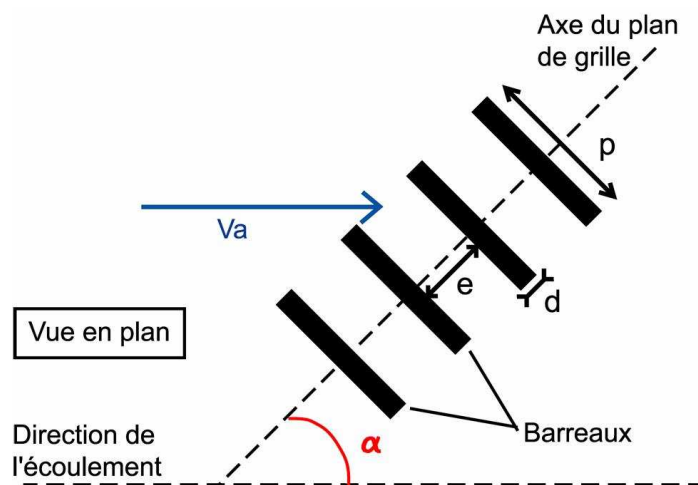


Figure 18 : Définition des angles et des dimensions au niveau d'un plan de grille orienté d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement.

Le coefficient K_F prend en compte l'influence de la forme des barreaux. Les valeurs pour différentes formes de barreaux ont été déterminées expérimentalement par Kirschmer (1926) et sont depuis reprises dans les différents ouvrages traitant des pertes de charge au niveau des grilles (ASCE, 1995 ; Giesecke et Mosonyi, 2005). Les valeurs présentées en Figure 19 sont valables pour un ratio entre la profondeur des barreaux et leur épaisseur (p/e) égal à 5 (sauf pour les barreaux circulaires). Pour des ratios supérieurs, il n'y a que peu de différence sur les pertes de charge (ASCE, 1995). Le coefficient K_F est d'autant plus faible que la forme des barreaux est « hydrodynamique », limitant les décollements de l'écoulement et la turbulence.

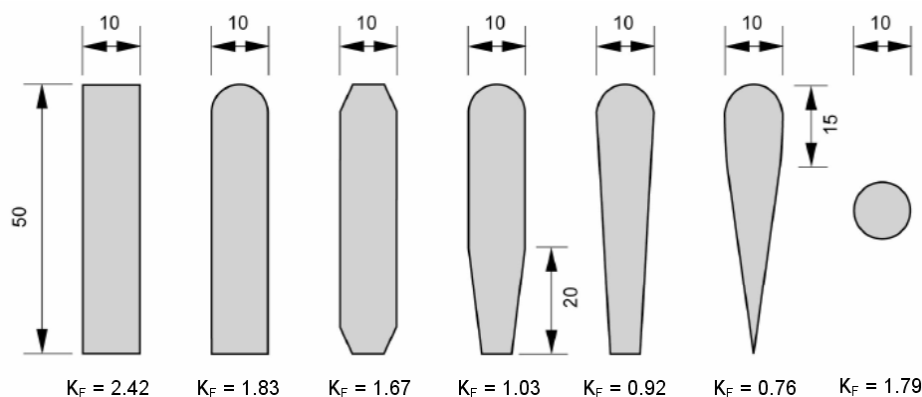


Figure 19 : Valeur du coefficient K_F selon la forme des barreaux (dimensions en mm), d'après Kirschmer (1926).

L'obstruction à l'écoulement que représente le plan de grille est prise en compte à travers le rapport entre l'épaisseur des barreaux d et l'espacement libre entre barreaux e . Plus l'épaisseur des barreaux est importante ou plus l'espacement est réduit, plus la perte de charge sera élevée et inversement.

L'influence de l'inclinaison d'un angle β du plan de grille par rapport à l'horizontale est proportionnelle à $\sin \beta$. Dans une configuration donnée (dimensions de la prise d'eau et vitesse d'approche fixées), un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale induit moins de perte de charge qu'un plan de grille vertical, la surface de filtration étant plus grande. Un angle β de 25° à la fois réduit ainsi la perte de charge et augmente la surface de grille d'un facteur 2.3 par rapport à un plan de grille vertical.

Les pertes de charge théoriques calculées par la formule de Kirschmer-Mosonyi se révèlent généralement inférieures à celles réellement constatées au niveau des grilles de prises d'eau des centrales hydroélectriques (Meusburger, 2002). Cela s'explique notamment par le fait que cette formule ne prend pas ou mal en compte deux paramètres déterminant pour la perte de charge :

- Le degré d'obstruction de la grille est sous-estimé en ne considérant que les barreaux. En particulier, l'obstruction due aux entretoises et aux éléments du support et du cadre assurant la rigidité n'est pas prise en compte.
- Le colmatage partiel de la grille n'est pas spécifiquement pris en compte, même si on peut tenter de l'intégrer en considérant une réduction de l'aire d'écoulement A et donc une augmentation de la vitesse d'écoulement V_A .

9.2.2. Formule de perte de charge de Meusburger

A partir de mesures en canal expérimental, Meusburger (2002) propose la formule suivante :

$$\Delta H = K_F \times K_O \times K_C \times K_\alpha \times K_\beta \times \frac{V_A^2}{2g}$$

Les 5 coefficients prennent en compte :

- K_F , l'influence de la forme des barreaux,
- K_O , l'influence du degré d'obstruction de la grille,
- K_C , l'influence du colmatage de la grille,
- K_α , l'influence de l'orientation en plan du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement (angle α),
- K_β , l'influence de l'inclinaison en coupe du plan de grille par rapport à l'horizontale (angle β).

Coefficient K_F

Les valeurs considérées pour le coefficient K_F fonction de la forme des barreaux sont celles de Kirschmer (1926) (voir Figure 19).

Coefficient K_O

Le coefficient K_O est déterminé à partir du degré d'obstruction O de la grille :

$$K_O = \left(\frac{O}{1-O} \right)^{3/2}$$

Le degré d'obstruction de la grille O est défini comme le rapport entre l'aire obstruée A_{obs} par les barreaux, les entretoises et les éléments de support et du cadre de rigidité (en noir dans le schéma ci-dessous), et l'aire totale de la grille A_{tot} :

$$O = \frac{A_{obs}}{A_{tot}} = \frac{A_{barreau} + A_{entretoises} + A_{support+cadre}}{A_{tot}}$$



Le degré d'obstruction O d'une grille doit être déterminé à partir des plans de construction. Les grilles de prise d'eau dimensionnées pour des questions de protection des turbines présentent généralement des degrés d'obstruction entre 0.1 et 0.4 (Meusburger, 2002). C'est-à-dire que l'aire d'entrée initialement libre de la prise d'eau peut être obstruée jusqu'à 40% par la grille. Les grilles avec des espacements réduits pour arrêter les poissons dévalant peuvent atteindre un degré d'obstruction de l'ordre de 0.55. Le Tableau 2 présente les degrés d'obstruction des différents plans de grille testés par Meusburger (2002).

Epaisseur des barreaux (mm)	Espacement libre entre les barreaux (mm)	Degré d'obstruction dû aux barreaux seuls	Degré d'obstruction total
15	135	0.10	0.19
15	45	0.25	0.34
15	22.5	0.40	0.46
15	15	0.50	0.55

Tableau 2 : Degrés d'obstruction testés par Meusburger (2002) (dimension prototype)

L'obstruction due aux entretoises et aux éléments du support et du cadre de rigidité peut représenter entre 10% et 70% de l'obstruction totale. Cette part de l'obstruction est d'autant plus importante que l'espacement libre entre les barreaux est grand. Elle n'est pas prise en compte dans la formule de Kirschmer-Mosonyi. Le coefficient de perte de charge K_o est d'autant plus fort que le degré d'obstruction O de la grille est élevé (Figure 20).

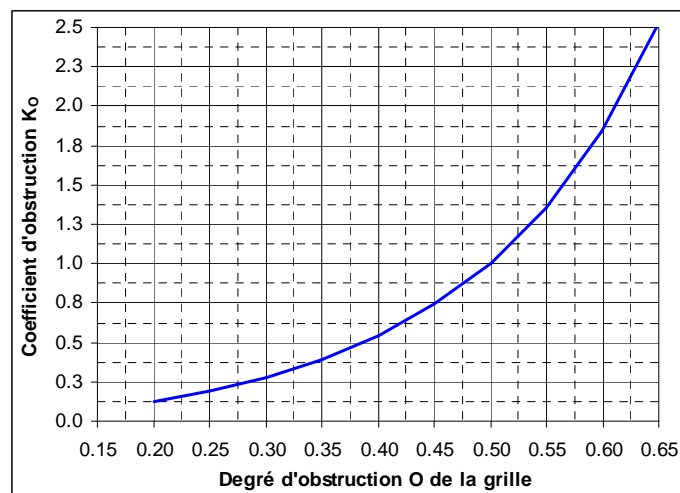


Figure 20 : Evolution de la valeur du coefficient K_o en fonction du degré d'obstruction O de la grille.

Coefficient K_c

Dans la pratique, le colmatage partiel d'une grille de prise d'eau de centrale hydroélectrique est généralement compris entre 5% et 10% de la surface de la grille en fonctionnement normal. Il peut représenter jusqu'à 25% en cas d'apport important (crue, chute automnale des feuilles, ...), et parfois même davantage, ce qui peut entraîner l'arrêt de la centrale. Les différents types de colmatage existant provenant des apports par charriage au fond, par transport en suspension ou en surface ont été modélisés de manière simplifiée par Meusburger (2002). Pour déterminer le coefficient K_c , on distingue 2 groupes de types de colmatage se caractérisant par des comportements distincts vis-à-vis de la perte de charge. Le premier groupe comprend deux types qui représentent des cas extrêmes de colmatage à 25% en pied de grille par des dépôts ou en partie supérieure de la grille par des matières flottantes (Tableau 3). Le second groupe comprend tous les autres types modélisés pour des colmatages partiels de 12.5% et 25%.

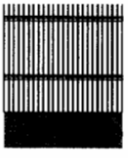
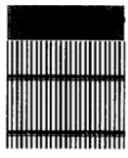
Groupe 1	
Type 1, C = 0.25	Type 2, C = 0.25
	

Tableau 3 : Types de colmatage dont le comportement relève du groupe 1.

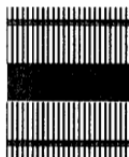

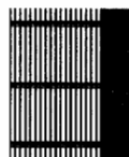
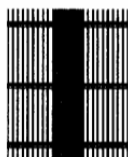
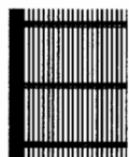
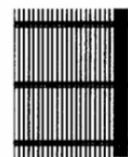
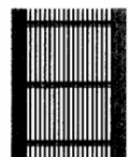
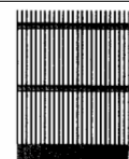


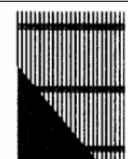
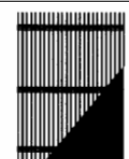
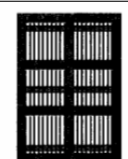
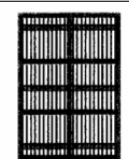
Groupe 2						
Type 3 C = 0.25	Type 4 C = 0.25	Type 5 C = 0.25	Type 6 C = 0.25	Type 7 C = 0.125	Type 8 C = 0.125	Type 9 C = 0.25
						
Type 10 C = 0.125	Type 11 C = 0.25	Type 12 C = 0.25	Type 13 C = 0.25	Type 14 C = 0.25	Type 15 C = 0.25	Type 16 C = 0.125
						

Tableau 4 : Types de colmatage dont le comportement relève du groupe 2.

Le degré de colmatage C est défini comme le rapport entre l'aire colmatée A_{col} (en noir dans le schéma ci-dessous) et l'aire totale de la grille A_{tot} :

$$C = \frac{A_{col}}{A_{tot}}$$



Pour le groupe 1, le coefficient K_{C1} est déterminé à partir du degré d'obturation O et du degré de colmatage C de la grille :

$$K_{C1} = 1 + 5.2 \times O^{-1.5} \times \left(\frac{C}{1-C} \right)^2$$

Le coefficient K_{C1} est d'autant plus fort que le degré de colmatage C est élevé (Figure 21).

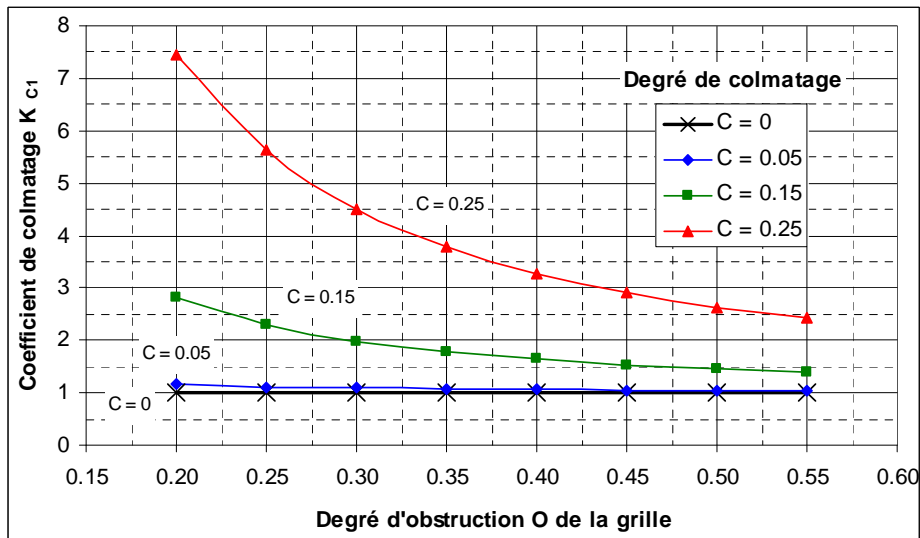


Figure 21 : Evolution de la valeur du coefficient K_{C1} en fonction du degré d'obstruction de la grille O et du degré de colmatage C .

Pour le groupe 2, le degré de colmatage présente le même comportement vis-à-vis de la perte de charge que le degré d'obstruction de la grille. Le colmatage est pris en compte au travers d'un seul terme correspondant aux deux coefficients K_O et K_{C2} , à partir du degré de blocage B déterminé comme suit :

$$B = O + (1 - O) \times C$$

On a alors pour le produit des deux coefficients $K_O \times K_{C2}$:

$$K_O \times K_{C2} = K_B = \left(\frac{B}{1 - B} \right)^{3/2}$$

La valeur de $K_O \times K_{C2}$ augmente avec le degré de colmatage C . L'influence du colmatage est d'autant moins sensible que le degré d'obstruction initial de la grille est fort. A partir d'un degré d'obstruction de 0.2, un colmatage à 25% induit un blocage total de 0.4 (+ 100%) et multiplie les pertes de charge par un facteur 4.35, alors qu'à partir d'un degré d'obstruction de 0.5, un tel colmatage induit un blocage total de 0.63 (+ 26%) et multiplie les pertes de charge par un facteur 2.15 (Figure 22 et Figure 23).

A un degré de colmatage donné, les types de colmatage du groupe 1 entraînent une augmentation des pertes de charge plus importante que les types de pertes de charge du groupe 2 (comparaison des Figure 21 et Figure 23). Cela semble lié d'une part au fait que les structures tourbillonnaires verticales induites par les types de colmatage 1 et 2 se superposent aux structures tourbillonnaires horizontales induites par les barreaux de la grille, créant ainsi une zone tourbillonnaire tridimensionnelle plus dissipatrice d'énergie, ce qui explique notamment la distinction avec les types de colmatage 4 et 5. D'autre part, cela semble lié à la courbure des lignes de courant et à la taille de la zone de recirculation qui sont plus importantes dans le cas des types 1 et 2 où l'écoulement ne contourne la partie obstruée que par un seul côté, que dans le cas notamment du type 3 où l'écoulement contourne la partie obstruée par les deux côtés (Meusburger, 2002).

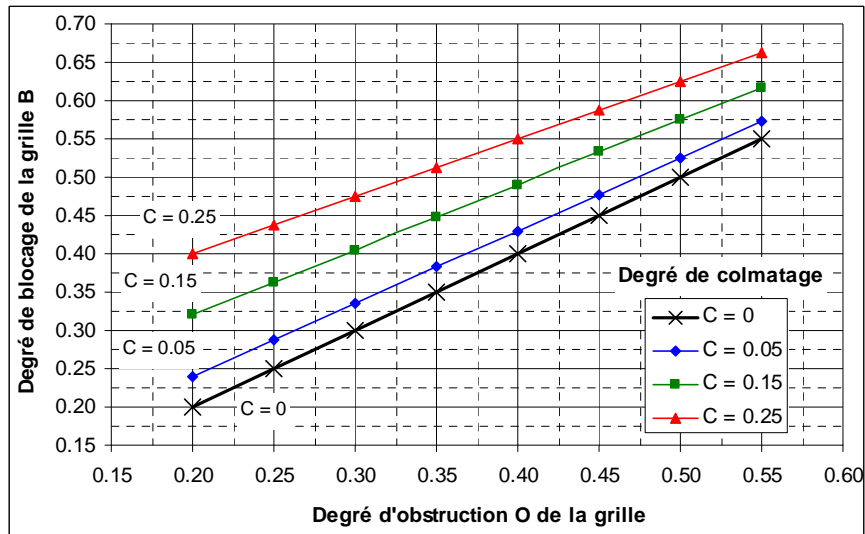


Figure 22 : Evolution de la valeur du degré de blocage **B** en fonction du degré d'obstruction de la grille **O** et du degré de colmatage **C**.

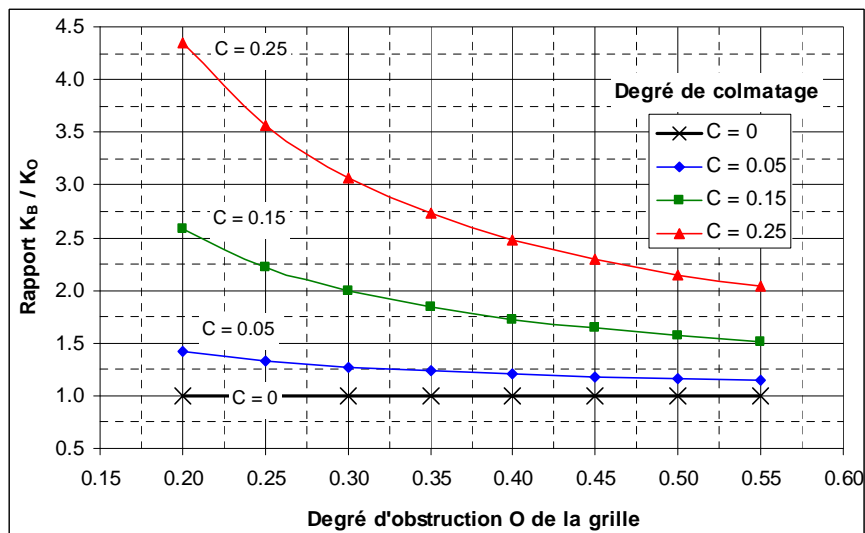


Figure 23 : Evolution du rapport K_B / K_O en fonction du degré d'obstruction de la grille **O** et du degré de colmatage **C**.

Coefficient K_α

Le coefficient K_α est déterminé à partir du degré d'obstruction **O** et de l'angle α (en degré) :

$$K_\alpha = \frac{\alpha}{90} \times O^{\frac{-1.4}{\tan \alpha}}$$

Lorsque le plan de grille est perpendiculaire à la direction de l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$), le coefficient K_α est pris égal à 1.

Le coefficient K_α est d'autant plus fort que l'angle α est faible, donc que l'inclinaison du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement est forte (Figure 24). L'influence de l'inclinaison du plan de grille est cependant de moins en moins importante lorsque le degré d'obstruction de la grille augmente. Cela est dû au fait que le redressement de l'écoulement est d'autant plus efficace que l'espacement entre les barreaux est faible et donc que l'obstruction de la grille est forte.

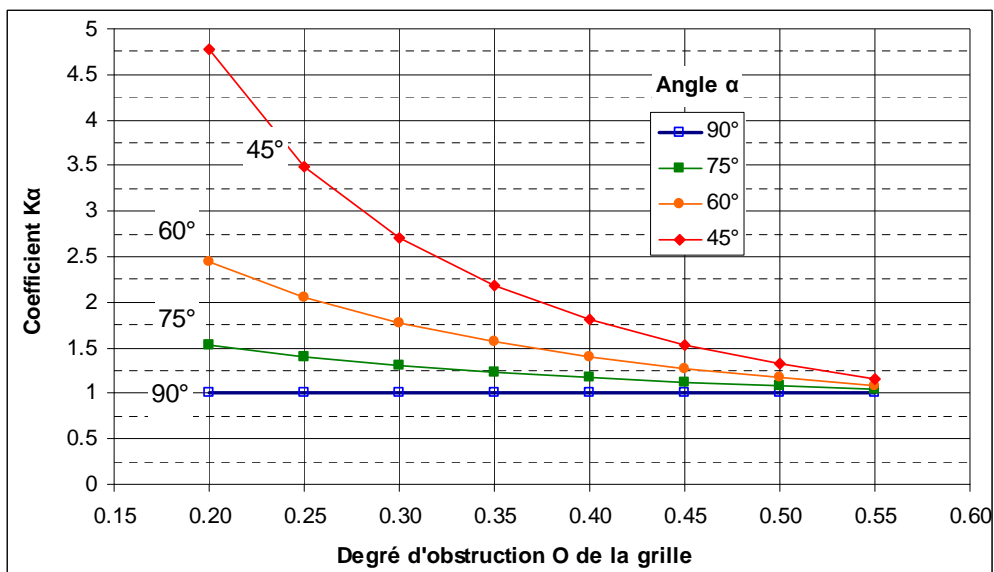


Figure 24 : Evolution de la valeur du coefficient K_a en fonction du degré d'obstruction O de la grille et de l'angle α d'inclinaison de la grille par rapport à la direction de l'écoulement.

Coefficient K_β

L'influence de l'inclinaison d'un angle β du plan de grille par rapport à l'horizontale est proportionnelle à $\sin \beta$ (Figure 25).

$$K_\beta = \sin \beta$$

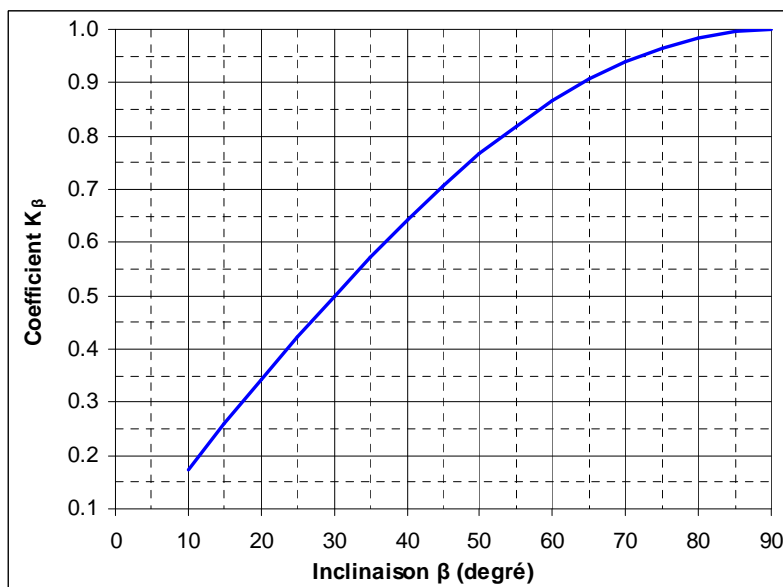


Figure 25 : Evolution de la valeur du coefficient K_β en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale β .

Domaine d'application de la formule

La formule est adaptée aux cas des grilles généralement rencontrées au niveau des prises d'eau de centrales hydroélectriques :

- espacements libres entre barreaux e de l'ordre de 15 mm à 135 mm,
- degrés d'obstruction O de l'ordre de 0.2 à 0.55
- vitesses d'approche de l'ordre de 0.5 m/s à 1.5 m/s
- rapport profondeur sur épaisseur des barreaux (p/e) compris entre 5 et 10, pour la validité des coefficients de forme des barreaux et des questions de redressement de l'écoulement lorsque le plan de grille est orienté en plan.
- angles α d'orientation du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement compris entre 45° et 90°
- degrés de colmatage C représentant jusqu'à 25% de la surface de la grille.

9.2.3. Comparaison des formules de pertes de charge de Kirschmer-Mosonyi et de Meusburger

Les formules de Kirshmer-Mosonyi et de Meusburger ont été comparées dans les deux types de configuration « ichtyocompatible » : un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale d'un angle β égal à 25° et un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement d'un angle α égal à 45°.

On a considéré un plan de grille à barreaux de profil rectangulaire ($K_F = 2.42$), avec une épaisseur de barreaux d de 10 mm. La comparaison est effectuée pour 3 valeurs d'espacement libre e (15, 20 et 25 mm), correspondant respectivement à des degrés d'obstruction O du plan de grille de l'ordre de 0.47, 0.40 et 0.36, ainsi que pour différents taux de colmatage C (nul, 15% et 25%). Dans la formule de Meusburger, le colmatage est de groupe 2 ; dans la formule de Kirschmer-Mosonyi, le colmatage a été pris en compte par une augmentation de la vitesse d'approche (réduction de l'aire d'écoulement).

Dans le cas d'un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale ($\beta = 25^\circ$), les coefficients de perte de charge de Meusburger se révèlent supérieurs à ceux de Kirschmer-Mosonyi, quels que soient l'espacement ou le degré de colmatage. L'écart est de l'ordre de + 40% pour un colmatage nul ; il atteint entre + 80% et + 115% selon l'espacement libre pour un colmatage à 25%. (Tableau 5)

Taux de colmatage du plan de grille	Espacement libre (mm)		
	15	20	25
nul	+ 43 %	+ 37 %	+ 43 %
à 15%	+ 67 %	+ 71%	+ 88 %
à 25%	+ 80 %	+ 91%	+ 115 %

Tableau 5 : Ecarts du coefficient de perte de charge global de Meusburger par rapport à celui de Kirschmer-Mosonyi, plan de grille incliné par rapport à l'horizontale d'un angle ($\beta = 25^\circ$).

Dans le cas d'un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement ($\alpha = 45^\circ$; dans la formule de Kirschmer-Mosonyi K_α égal à 2.5, 2.2 et 1.9 pour les espacement libre de 25, 20 et 15 mm respectivement). Les coefficients de perte de charge de Meusburger se révèlent supérieurs à ceux de Kirschmer-Mosonyi. L'écart augmente avec l'espacement libre et le taux de colmatage, atteignant par exemple + 80% pour un espacement libre de 25 mm et un taux de colmatage à 25% (Tableau 6).

Taux de colmatage du plan de grille	Espaceur libre (mm)		
	15	20	25
nul	+ 9 %	+ 13 %	+ 20 %
à 15%	+ 27 %	+ 41 %	+ 57 %
à 25%	+ 37 %	+ 57 %	+ 80 %

Tableau 6 : Ecarts du coefficient de perte de charge global de Meusburger par rapport à celui de Kirschmer-Mosonyi, plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement ($\alpha = 45^\circ$).

Pour illustrer cette comparaison, les Figure 26 et Figure 27 présentent les pertes de charge données par les deux formules selon la vitesse d'approche et le taux de colmatage, dans chacune des configurations du plan de grille, pour un espaceur libre de 15 mm.

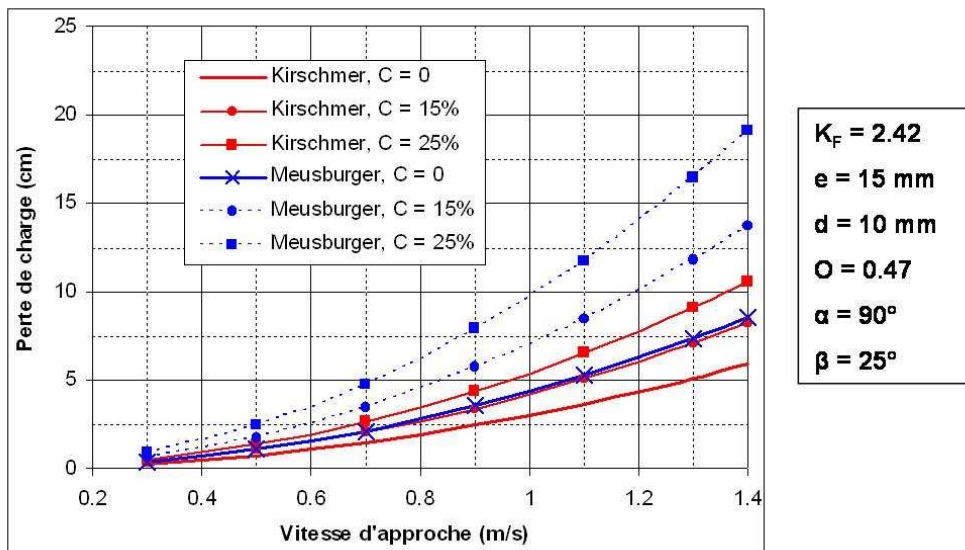


Figure 26 : Comparaison des pertes de charge données par les formules de Kirschmer-Mosonyi et de Meusburger, plan de grille incliné en coupe par rapport à l'horizontale ($\beta = 25^\circ$).

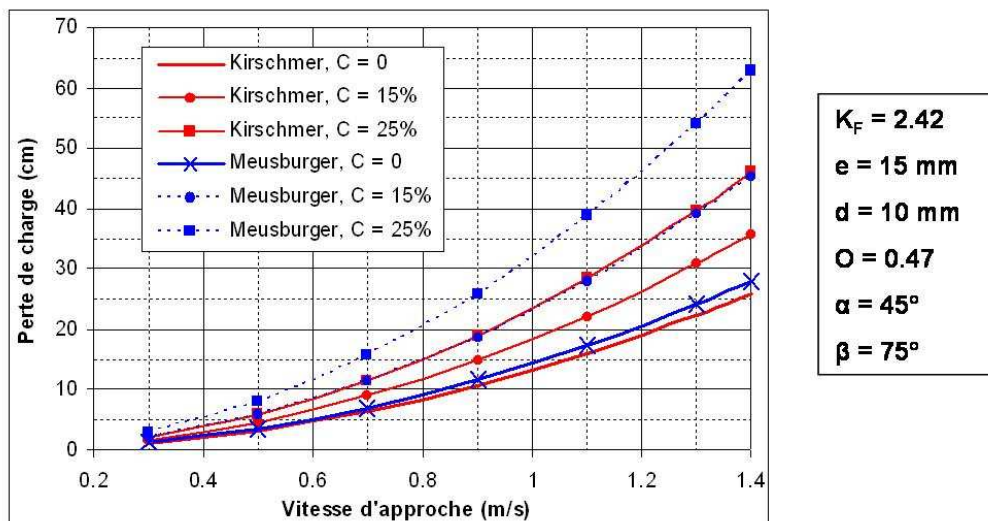


Figure 27 : Comparaison des pertes de charge données par les formules de Kirschmer-Mosonyi et de Meusburger, plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement ($\alpha = 45^\circ$).

9.2.4. Formule préconisée pour l'évaluation des pertes de charge

L'emploi de la formule de Meusburger²⁰ est préférable à celui des formules plus anciennes étant donné qu'elle prend en compte l'ensemble des paramètres, dont notamment le degré d'obstruction globale de la grille (barreaux, entretoises et éléments du support), l'orientation en plan par rapport à la direction de l'écoulement et le degré de colmatage de la grille.

La formule de Meusburger est notamment reprise dans la quatrième édition de l'ouvrage de Giesecke et Mosonyi (2005) sur les centrales hydroélectriques (Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb), et remplace celle de Kirschmer-Mosonyi.

La formule de Meusburger est celle utilisée dans la suite de ce rapport.

A noter que les formules ne donnent que les pertes de charge dues au plan de grille et qu'il convient d'y rajouter celles dues à la prise d'eau et son environnement.

9.3. Degré d'obstruction des plans de grille à espacement réduit

Pour fixer les ordres de grandeur, la Figure 28 présente le degré d'obstruction d'un plan de grille selon l'épaisseur des barreaux et leur espacement. Le plan de grille considéré présente des entretoises de 15 mm d'épaisseur, espacées de 40 cm, et des pannes transversales pour supporter le plan de grille, d'épaisseur 200 mm, espacées de 3 m. L'obstruction due à ces seuls éléments de rigidité et de support représente déjà plus de 10% de la surface de la grille.

Le degré d'obstruction augmente au fur et à mesure que l'espacement entre les barreaux est réduit. Pour un espacement donné, il est ensuite d'autant plus important que les barreaux sont épais. Pour limiter le degré d'obstruction de la grille et les pertes de charges, on a donc intérêt pour un espacement donné à adopter une épaisseur de barreaux la plus faible possible, dans la limite des considérations sur la résistance mécanique propre du plan de grille et ses conditions de stabilité. Cette épaisseur minimale dépend fortement des exigences posées lors du dimensionnement.

Dans la gamme d'espacements préconisés pour arrêter les smolts ou les anguilles argentées (15 mm à 25 mm), compte tenu des vitesses normales inférieures ou égales à 0.5 m/s, il apparaît possible d'adopter des barreaux moins épais que pour une grille conventionnelle, les contraintes étant réparties sur un nombre plus important de barreaux ; c'est-à-dire des barreaux d'une épaisseur de l'ordre de 5 à 8 mm selon la longueur des barreaux (Bansard, com. pers.). En considérant une épaisseur de barreaux de 8 mm, les degrés d'obstruction pour des espacements de 15, 20 et 25 mm atteignent respectivement environ 0.42, 0.36 et 0.32.

Selon EDF, la prise en compte des aspects dynamiques de la grille aboutit à une épaisseur minimale des barreaux plus importante, de l'ordre de 13 mm (Goudal, com. pers.). Les degrés d'obstruction pour des espacements de 15, 20 et 25 mm atteignent alors respectivement environ 0.52, 0.46 et 0.41. A noter cependant que les plans de grilles à espacements réduits (inférieur ou égal à 30 mm) installés au niveau des aménagements EDF présentent des épaisseurs de barreaux comprises entre 6 mm et 10 mm, le plus souvent égales à 8 mm.

²⁰ A titre d'information, Meusburger (2002) compare la formule qu'il propose avec d'une part plusieurs formules anciennes et d'autre part des mesures in situ.

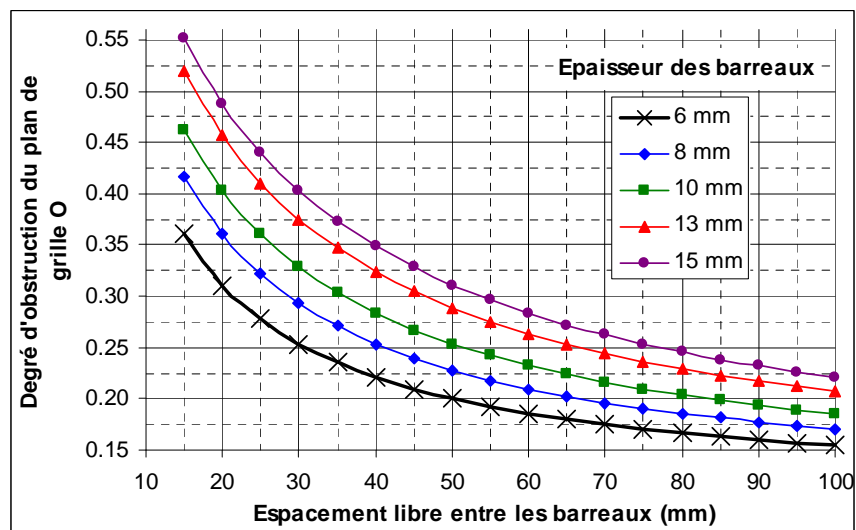


Figure 28 : Degré d'obstruction d'un plan de grille selon l'épaisseur des barreaux et leur espacement (obstruction due aux seuls éléments de rigidité et de support de l'ordre de 10%).

9.4. Forme de barreaux limitant les pertes de charge et/ou le colmatage permanent

Deux types de considérations peuvent amener à envisager une forme de barreaux différente de la forme rectangulaire généralement utilisée : des pertes de charge trop importantes ou un colmatage permanent par des éléments venant se bloquer entre les barreaux et que le dégrilleur n'est pas en mesure d'enlever. Le problème du colmatage permanent se pose notamment au niveau de prises d'eau sur des cours d'eau charriant des galets-graviers de taille voisine de l'espacement des barreaux.

Pour limiter les pertes de charge trop importantes, il s'agit d'adopter une forme de barreaux plus hydrodynamique présentant un coefficient de perte de charge plus faible.

Pour limiter le colmatage permanent, il s'agit d'adopter une forme limitant la zone où l'espacement entre barreaux est minimal, de sorte que si un corps arrive à franchir cette zone, il franchira alors complètement la grille et ne restera pas bloqué. L'emploi de barreaux « rond-soudés » constitue ainsi une solution relativement efficace contre ce phénomène, exemple EDF de la centrale de Saint-Criq et de la prise d'eau de Braman. Toutefois, la soudure de rond à la face amont de barreaux de profil rectangulaire est une solution difficilement généralisable étant donné le surcoût de fabrication de la grille.

La forme de barreaux présentée ci-dessous (Figure 29), avec une face amont arrondie et une face aval biseautée, semble la plus envisageable pour à la fois limiter les pertes de charge et le problème du colmatage permanent. Elle présente un coefficient de forme K_F égal à 0.92, environ 2.5 fois plus faible que pour une forme rectangulaire. Cette forme de barreaux semble d'autre part pouvoir être laminée directement.

L'assemblage sur des peignes découpés au laser formant entretoises ne nécessite pas de conserver la partie aval des barreaux avec des faces parallèles comme pour un assemblage par enfilage sur des tiges filetées.

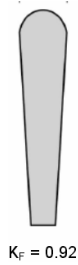


Figure 29 : Forme de barreaux envisagée pour limiter les pertes de charge et le problème du colmatage permanent.

9.5. Commentaire sur la prise en compte de l'orientation du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement

L'orientation variable du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement a été à ce jour reproduite dans les dispositifs expérimentaux de deux manières différentes.

Zimmerman (1969) a étudié l'orientation de l'écoulement par rapport au plan de grille en faisant pivoter chaque barre de la grille (Figure 30). L'inconvénient de ce dispositif est qu'il diffère du cas des grilles de prise d'eau, les barreaux n'étant plus perpendiculaires à l'axe du plan de grille. Les positions dans le plan horizontal des barreaux les uns par rapport aux autres dans le dispositif de Zimmerman sont donc différentes du cas des grilles de prise d'eau. Il n'est donc pas certain que les phénomènes de déviation des lignes de courant et de formation des structures tourbillonnaires dissipatrices d'énergie, et donc les pertes de charge, soient comparables.

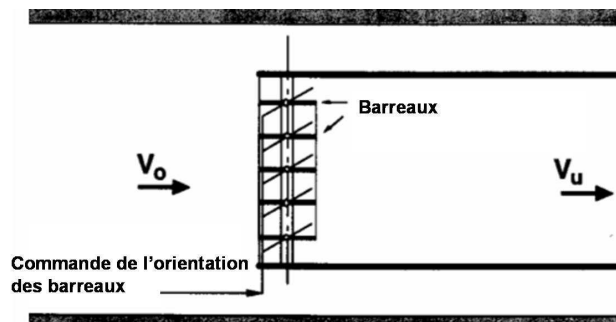


Figure 30 : Principe du dispositif expérimental reproduisant un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement utilisé par Zimmerman (1969).

Meusburger (2002) a adopté le même dispositif expérimental que Idel'cik (1979) ou Spangler (1928) : le plan de grille est positionné au niveau d'une articulation du canal expérimental, l'angle d'orientation étant défini comme l'angle de l'articulation du canal (Figure 31). Ce dispositif expérimental reproduit le cas de prise d'eau où l'écoulement à l'aval de la grille part dans la direction perpendiculaire au plan de grille, les lignes de courant n'étant alors déviées qu'une seule fois.

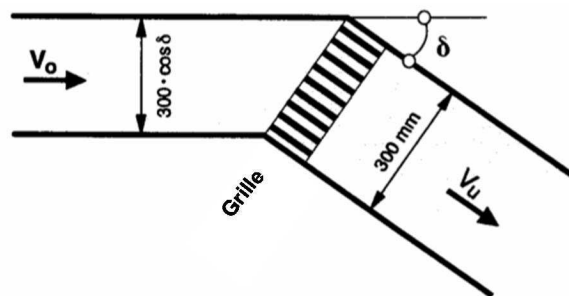


Figure 31 : Principe du dispositif expérimental reproduisant un plan de grille orienté en plan par rapport à la direction de l'écoulement utilisé par Meusburger (2002).

Le cas d'un plan de grille orienté par rapport à l'écoulement et installé dans la configuration présentée en Figure 4, c'est-à-dire avec une direction de l'écoulement similaire en amont et en aval du plan de grille, n'a pour l'instant pas été pris en compte. Dans cette configuration, les lignes de courant subissent une première déviation à l'entrée du plan de grille, puis une seconde déviation à la sortie pour retrouver la direction initiale de l'écoulement. Il serait intéressant de tester l'adaptation de la formule de Meusburger à ce cas.

De plus, le domaine d'application de la formule de Meusburger est restreint à des angles α compris entre 45° et 90°. Or, dans le cadre des prises d'eau ichtyocompatibles, l'orientation du plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement peut s'avérer plus forte ($\alpha < 45^\circ$). Il serait donc nécessaire de tester cette formule pour de telles orientations afin de déterminer si elle est adaptée, et dans le cas contraire afin d'y apporter les compléments nécessaires.

L'étude de l'influence sur la perte de charge de l'orientation d'un plan de grille par rapport à la direction de l'écoulement fait partie des besoins de R&D.

9.6. Hétérogénéité et contrôle des vitesses d'approche

Le guidage efficace des poissons le long d'un plan de grille nécessite des vitesses d'approche homogènes. Une zone de faibles vitesses peut causer l'échec du guidage, les poissons n'étant plus entraînés par la vitesse tangentielle, alors qu'une zone de fortes vitesses peut causer le passage au travers ou le placage contre la grille des poissons. La formation de contre-courants peut parfois provoquer une inversion locale du sens de l'écoulement à travers le plan de grille. Une mauvaise hydrodynamique à l'approche d'un plan de grille (ou d'un louver) est ainsi souvent la cause de faible efficacité des dispositifs (Pearce et Lee, 1991 ; Scruton et al, 2003). Les pertes de charge au niveau d'un plan de grille ne sont pas toujours assez importantes pour uniformiser les vitesses d'approche. Une attention particulière doit donc être portée à l'hydrodynamique à l'approche d'un plan de grille.

La non-uniformité des vitesses à l'approche d'un plan de grille peut être due à l'environnement de la prise d'eau. Une courbure du canal d'amenée en amont, une transition abrupte au niveau des berges, un fond irrégulier peuvent avoir un impact sur le champ de vitesse sur une distance considérable. Dans la mesure du possible, le canal d'amenée devra présenter une section transversale régulière sur une longueur suffisante à l'amont du plan de grille.

Dans le cas de centrales avec plusieurs turbines, la non-uniformité des vitesses à l'approche d'un plan de grille peut également être due aux modalités d'exploitation des différentes turbines. Dans la mesure du possible, le plan de grille sera placé suffisamment en amont des entonnements des turbines pour ne pas en subir l'influence.

L'inclinaison ou l'orientation du plan de grille ont tendance à provoquer une augmentation de la vitesse d'approche de l'amont vers l'aval, et par conséquent une augmentation des vitesses normale et tangentielle. Il en résulte qu'il transite un débit plus important dans la partie aval du plan de grille que dans la partie amont (EPRI, 1987 ; Breinig et al, 2003 ; Katopodis et al, 2005 ; Rajaratnam et al 2006). Les travaux de Breinig et al (2003) sur l'écoulement au travers d'une grille de type Johnson de porosité faible (18%) inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale montrent notamment que l'augmentation de la vitesse normale le long du plan de grille est d'autant plus importante que l'inclinaison est forte : la vitesse normale à l'extrémité aval de la grille atteint environ 1.2 fois la vitesse normale théorique pour des angles β de 35° et 25° et environ 1.4 fois la vitesse normale théorique pour un angle de 15°.

Lors de la conception d'un dispositif de dévalaison, une étude sur modèle réduit peut s'avérer utile pour obtenir une hydrodynamique générale favorable, en particulier au niveau d'une prise d'eau importante (Pearce et Lee, 1991, Scruton et al, 2003).

Les problèmes d'hétérogénéité des vitesses d'approche du fait d'une mauvaise hydrodynamique générale peuvent éventuellement être solutionnés par le positionnement à l'amont du plan de grille d'un ou plusieurs murs guideau pour y améliorer la répartition du débit. Lors de l'implantation de murs guideaux à l'amont d'un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement, il faut veiller à ce qu'ils soient assez éloignés du plan de grille pour permettre l'établissement des vitesses tangentielles indispensable au guidage des poissons vers l'exutoire.

Au niveau d'un plan de grille quasi vertical et orienté par rapport à la direction de l'écoulement, les problèmes d'hétérogénéité des vitesses d'approche dus à l'hydrodynamique générale ou à l'orientation elle-même peuvent également être corrigés en installant un système d'aiguilles verticales juste en aval du plan de grille, sur la partie où les vitesses d'approche dépassent la valeur recherchée. Le dispositif doit être placé suffisamment en retrait du plan de grille pour qu'il soit indépendant d'un point de vue hydraulique et que les pertes de charge au passage du plan de grille et au passage des aiguilles s'additionnent. Les aiguilles, en ajustant localement leur porosité, permettent ainsi de contrôler les pertes de charges. La porosité doit être d'autant plus faible que les vitesses normales au plan de grille initiales dépassent la valeur recherchée. Le système doit être modulable pour permettre un ajustement par essai-erreur. Un tel dispositif augmente globalement les pertes de charges et ce d'autant plus que les conditions hydrodynamiques initiales sont défavorables (Pearce et Lee, 1991).

Au niveau d'un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale, on peut envisager d'adopter une porosité de grille décroissante de l'amont vers l'aval, pour contrebalancer la tendance à l'augmentation des vitesses vers l'aval du fait de l'inclinaison. Cette solution a notamment été testée au niveau de grille à forte vitesse d'approche de type Eicher (Winchell et al, 1993). L'uniformité des vitesses est d'autant mieux rétablie que l'évolution de la porosité est graduelle.

En l'état actuel des connaissances, les rôles de l'inclinaison du plan de grille et de la valeur de la vitesse d'approche moyenne théorique sur le phénomène d'augmentation le long du plan de grille des vitesses normales et tangentielles ne sont pas clairement quantifiés. Ces aspects font partie des besoins de R&D. Une étude sur modèle réduit permettrait de quantifier le phénomène selon l'angle d'inclinaison ou d'orientation et la vitesse d'approche moyenne.

10. COLMATAGE ET DEGRILLAGE

10.1. Colmatage

Au niveau d'une centrale hydroélectrique, une partie des corps flottants et/ou immergés transportés par l'écoulement sont arrêtés par le plan de grille disposé à l'amont des turbines et le colmatent progressivement. Ces corps peuvent être d'origine naturelle (galets-graviers, végétation aquatique, feuilles, branches, jusqu'à des troncs d'arbres durant les crues...) ou d'origine anthropique (plastiques, polystyrène...), la majorité des corps étant généralement d'origine naturelle. Un dégrillage périodique est donc nécessaire pour ôter ces corps de la grille, de façon à éviter l'apparition de pertes de charge trop importantes et être toujours en mesure de transiter le débit turbiné. Les dégrillats peuvent être soit rejetés dans le cours d'eau à l'aval de la centrale, soit retirés du cours d'eau, ce qui pose alors la question de leur traitement et de leur devenir. A noter que dans le cas d'une goulotte commune à l'évacuation des poissons et des dégrillats, il devient alors très difficile de retirer ces derniers du cours d'eau.

10.2. Principe de dégrillage

Le dégrillage peut s'opérer à la descente ou à la remontée le long du plan de grille.

Le principe du dégrillage à la remontée est de venir plaquer l'organe dégrilleur au pied du plan de grille et de le remonter progressivement jusqu'au sommet. Ce mode d'opération est le plus courant. Les dégrillats sont ensuite généralement évacués via une goulotte alimentée en eau. Son alimentation peut s'effectuer par un orifice lorsque le fond de la goulotte se trouve en deçà du niveau d'eau, ou s'effectue sinon par pompage. L'organe dégrilleur peut être une brosse, un râteau ou une poche. Il est actionné par chaîne mécanique ou placé au bout d'un bras rigide mis en mouvement par crémaillères ou vérins hydrauliques, ou au bout d'un bras articulé par des vérins hydrauliques.

Le principe du dégrillage à la descente est de venir plaquer en partie haute du plan de grille un organe dégrilleur et de le descendre progressivement le long de la grille. Les dégrillats sont accumulés dans une poche se refermant une fois au fond, puis sont remontés à la surface. Ce mode d'opération n'est mis en œuvre qu'au niveau des prises d'eau profondes. L'organe dégrilleur est alors généralement monté sur un chariot relié par des câbles et qui descend par gravité.

Un dégrilleur peut être commandé par un opérateur ou automatisé. Il peut être fixe ou mobile le long du plan de grille en se déplaçant sur des rails soit posés sur une plateforme, soit suspendus (Figure 32 b, e, et l). La taille et le nombre de dégrilleurs au niveau d'un plan de grille, ainsi que leurs durée et cadence de dégrillage dépendent de la quantité maximale et du type de détritits attendus. Dans le cas d'un dégrillage automatisé, il peut être effectué selon un pas de temps régulier ou être assujetti à la perte de charge au niveau du plan de grille.

Les principaux types de dégrilleurs sont :

- Dégrilleur à chaîne mécanique (Figure 32 a et c), jusqu'à des largeurs de 6 m et des hauteurs d'eau de 4 m, pour un coût entre 10 000 et 20 000 €.
- Dégrilleur à bras rigide actionné par crémaillères ou vérins hydrauliques (Figure 32 b et d).
- Dégrilleur à bras articulé par des vérins hydrauliques (Figure 32 e, h et i), jusqu'à une hauteur d'eau de 10-12 m, voire plus, pour un coût entre 25 000 et 100 000 €.
- Dégrilleur à câble ou à poche (Figure 32 j, k l et m), sans limite de profondeur, pour un coût entre 100 000 et 700 000 €.

Une grue forestière peut être jointe au dégrilleur pour enlever notamment les grosses branches et les troncs d'arbres (Figure 32 k et m). Dans le cas de bras articulé, cette fonction peut également être donnée à l'organe dégrilleur qui se présente alors sous forme de pince (Figure 32 f et g). Un dégrilleur à bras articulé, s'il pivote, peut également être utilisé pour manipuler les panneaux de grille (Figure 32 i).



Figure 32 : Exemples de différents types de dégrilleurs, **a** et **c** extrait de la notice Viry, **b** extrait de la notice AtlasPolar, **e** extrait de la notice Künz, **d** et **f** à **m** extraits de la notice Muhr.

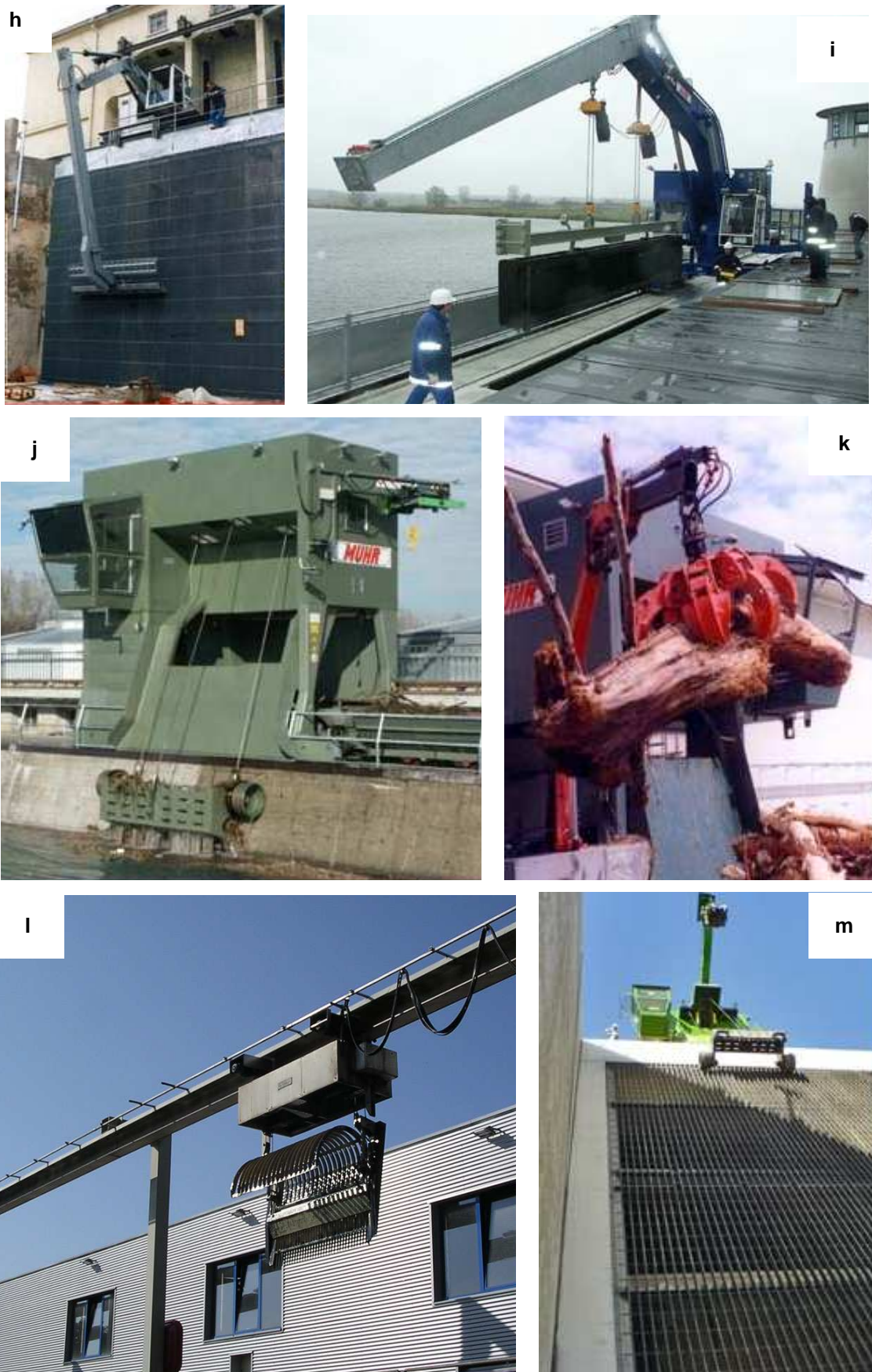


Figure 32 : Exemples de différents types de dégrilleurs, **a** et **c** extrait de la notice Viry, **b** extrait de la notice AtlasPolar, **e** extrait de la notice Künz, **d** et **f** à **m** extraits de la notice Muhr.

10.3. Dégrillage des prises d'eau « ichtyocompatibles »

Au niveau des aménagements de basse chutes équipés de turbines Kaplan, les espacements libres entre barreaux préconisés pour les grilles de prises d'eau « ichtyocompatibles » sont généralement plus faibles que ceux adoptés dans le seul souci de protection de la turbine. La quantité de corps filtrés par ces grilles est donc plus importante et le dégrilleur est davantage sollicité. Par contre, la limitation de la vitesse normale au plan de grille à des valeurs plus faibles que celles généralement rencontrées au niveau des prises d'eau conventionnelles en facilite le dégrillage. L'inclinaison du plan de grille par rapport à l'horizontale peut favoriser d'autre part son autonettoyage.

Un retour d'expérience réalisé par EDF sur l'exploitabilité de plans de grilles très fines (espacement inférieur à 30 mm) montre que les difficultés d'exploitation sont essentiellement liées :

- à une méconnaissance du type et du volume des corps charriés par le cours d'eau,
- à une sous-estimation de la vitesse de colmatage des grilles à espacement réduit,
- et par voie de conséquence, à l'installation de dégrilleurs sous-dimensionnés incapables de maintenir la grille dans un état de colmatage acceptable pour une exploitation satisfaisante de l'aménagement.

L'accent doit donc être mis sur la nécessité d'un dégrilleur adapté au type de corps charriés et correctement dimensionné. La durée d'un cycle complet de dégrillage doit notamment être compatible avec le flux maximal de corps attendus. L'automatisation du dégrilleur avec un asservissement à une perte de charge maximale (5 à 10 cm) permet une utilisation optimale du dégrilleur. Cette valeur est inférieure à celle généralement utilisée par les exploitants, mais elle permet d'anticiper le fonctionnement du dégrilleur (et donc de le faciliter) par rapport à une situation où le plan de grilles est déjà notablement colmaté. La mise en place à l'amont de pré-grilles grossières (espacement de 30 à 10 cm), d'une drôme ou d'un masque de surface permet de limiter la quantité de corps ensuite arrêtées par la grille fine.

10.3.1. Plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale

L'inclinaison du plan de grille à 26° par rapport à l'horizontale aboutit à des longueurs de grille d'environ 2.3 fois la hauteur d'eau. Un avantage de cette configuration vis-à-vis du dégrillage est qu'une partie des corps dérivants a tendance à glisser et remonter le long du plan de grille et à passer par les exutoires. Les faibles vitesses normales permettent également un décollement plus aisé des corps plaqués contre la grille. Certaines centrales présentent déjà des plans de grille fortement inclinés pour favoriser leur autonettoyage et sont parfois même dépourvues de systèmes de dégrillage. La Figure 33 présente le plan de grille incliné ($\beta = 7^\circ$) de la centrale des Baquets sur la Risle (débit turbiné $\approx 12 \text{ m}^3/\text{s}$). La vitesse d'approche est de l'ordre de 0.9 m/s et de la vitesse normale de l'ordre de 0.1 m/s. Il n'y a pas de système de dégrillage ; l'évacuation des déchets s'effectue latéralement au niveau d'un clapet, la hauteur d'eau au-dessus du sommet de grille étant d'environ 50 cm.

Bien que cette configuration se prête à la mise en œuvre d'un dégrilleur à chaîne mécanique, ce type de dégrilleur n'est pas préconisé. En effet, sa fiabilité de fonctionnement est grandement dégradée par la forte probabilité de blocage de l'organe dégrilleur en présence d'éléments coincés dans la grille.

L'installation d'un dégrilleur à bras rigide ou articulé est préconisée dans cette configuration, mais pose d'une part la question de la longueur du bras, et d'autre part celle du porte-à-faux lorsque le bras est déployé jusqu'en pied de grille. Pour assurer sa stabilité, un tel dégrilleur doit alors être lesté ou l'effort doit être reporté sur les éléments de structure. Si la faisabilité technique de longueur de bras jusqu'à 10-15 m, voire plus, est prouvée, le coût du dégrilleur et les problèmes dus au porte-à-faux augmentent rapidement avec la longueur du bras.

Cette configuration ne se prête pas à la mise en œuvre de dégrilleur à câble, l'inclinaison étant incompatible avec la descente du chariot par gravité.



Figure 33 : Plan de grille fortement incliné ($\beta = 7^\circ$) de la centrale des Baquets sur la Risle ($\approx 12 \text{ m}^3/\text{s}$)
(Photo Richard A.)

10.3.2. Plans de grille orientés à 45° par rapport à la direction de l'écoulement

Dans cette configuration, la grille est quasi-verticale ; une inclinaison minimale du plan de grille par rapport à la verticale de l'ordre de 10 à 20° (soit une inclinaison par rapport à l'horizontale de 70° à 80°) est toutefois nécessaire pour opérer un dégrillage efficace (ASCE, 1995). Les longueurs de grille restent voisines de la hauteur d'eau.

Le dégrillage est généralement effectué à l'aide soit de dégrilleurs à bras rigide ou articulé, soit de dégrilleurs montés sur chariot à câble pour les prises d'eau profondes. Cette configuration soumet la partie immergée du dégrilleur à un courant transversal qui génère deux difficultés qu'il est nécessaire de prendre en compte dans le choix de l'une ou l'autre des configurations :

- L'entraînement dans l'écoulement d'une partie des dégrillats décollés par le dégrilleur lors de son action. Ces dégrillats sont remis temporairement en suspension le temps d'être à nouveau plaqués contre la grille et contribuer au colmatage des panneaux de grille adjacents. Pour pallier ce phénomène, il faut dégriller de l'amont vers l'aval et prendre en compte dans le dimensionnement du dégrilleur cette surcharge de travail.
- Le risque d'entraînement latéral des organes immergés du dégrilleur (le bras hydraulique ou le chariot). Un chariot peut notamment dériver, se désaxer par rapport au corps du dégrilleur et se coincer lors de la montée, ou au pire se retourner. Il convient de s'assurer que le couple généré par le courant transversal soit acceptable pour le matériel.

11. DIMENSIONNEMENT DE PRISES D'EAU « ICHTYOCOMPATIBLES »

11.1. Démarche de dimensionnement

1. Les données de base nécessaires au dimensionnement sont le **débit maximal à transiter** (Q en m^3/s), les **dimensions et les cotes de la section** au sein de laquelle le dispositif doit s'insérer, et la **cote du plan d'eau amont**, ou les cotes minimales et maximales en cas de variation de niveau. Il est également utile d'avoir une idée du type de corps charriés par le cours d'eau et un ordre de grandeur des quantités maximales (retour d'expérience sur les aménagements voisins).

On en déduit la vitesse d'approche maximale V_A (m/s), rapport entre le débit maximal et l'aire de la section d'écoulement A (m^2) ($V_A = Q / A$).

2. Les espèces cibles concernées par l'aménagement et leur taille doivent être clairement définies. En découlent les critères biologiques sur :
 - a. l'espacement libre maximal admissible entre les barreaux.
 - b. la vitesse normale au plan de grille maximale admissible $V_{N,MAX}$ (m/s).

Dans le cas d'un dispositif à vocation multispécifique, les critères de l'espèce la plus contraignante doivent être pris en compte.

3. La surface minimale du plan de grille S (m^2) est calculée en fonction de la vitesse normale maximale et du débit maximal à transiter ($S = Q / V_N$) et doit être systématiquement majorée pour la prise en compte du colmatage partiel de la grille.
4. Les choix du type de disposition du plan de grille (inclinaison / orientation) et du système de dégrillage doivent être réalisés de façon conjointe en fonction :
 - a. des possibilités d'insertion de la surface minimale du plan de grille S selon les critères sur les angles d'inclinaison ou d'orientation du plan de grille et les dimensions de la section au sein de laquelle le dispositif doit s'insérer. L'inclinaison ou l'orientation du plan de grille peuvent parfois être accentuées par rapport aux valeurs minimales biologiques ($\beta = 26^\circ$; $\alpha = 45^\circ$) de façon à respecter la surface minimale du plan de grille.
 - b. des contraintes de positionnement du ou des exutoires et de transfert des poissons vers l'aval.
 - c. des possibilités des différents systèmes de dégrillage en rapport le type et la quantité des corps charriés.
 - d. des contraintes d'évacuation des dégrillats.

5. Le dimensionnement du ou des exutoires est effectué en fonction :
 - a. du débit de dévalaison qui doit être à l'échelle du débit maximum turbiné (2 à 10%).
 - b. des dimensions minimales (largeur et hauteur d'eau).
 - c. des vitesses d'écoulement à l'entrée qui doivent être égales, voire légèrement supérieures à la vitesse tangentielle au plan de grille.

La section de contrôle du débit doit être clairement définie et dimensionnée. Elle se situe de préférence, non pas au niveau de l'entrée de l'exutoire, mais un peu plus en aval.

6. Il faut vérifier que les pertes de charge induites par la grille propre (sans colmatage) sont compatibles avec l'exploitation hydroélectrique. L'asservissement du système de dégrillage doit ensuite être défini de façon à :
 - a. limiter les pertes de charge à une valeur maximale compatible avec l'exploitation hydroélectrique.
 - b. éviter un taux de colmatage et une augmentation des vitesses normales trop importants, risquant d'induire le placage des poissons sur la grille ou leur passage au travers.

L'accent est mis sur la nécessité d'un système de dégrillage adapté au type de corps charriés et correctement dimensionné pour répondre aux sollicitations.

Dans le cas où tous les critères précédents ne peuvent être satisfaits, on peut envisager de modifier les dimensions de la section au sein de laquelle le dispositif doit s'insérer (approfondissement ou élargissement pour permettre notamment une meilleure insertion du dispositif et/ou une augmentation de la surface de grille). Si les pertes de charge induites par le plan de grille sont trop importantes vis-à-vis de l'exploitation hydroélectrique, on peut envisager le recours à des formes de barreaux profilés.

11.2. Exemple de dimensionnement de prise d'eau « ichtyocompatible »

La plupart des aménagements hydroélectriques rencontrés sur les axes de migrations des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique ou de truite de mer sont des aménagements de basse chute, inférieure à 10 m, équipés généralement de turbines Kaplan. Le plan de grille est généralement disposé à l'amont immédiat de l'entonnement vers les turbines. Les dimensions de la section au sein de laquelle il doit s'insérer sont ainsi dictées par les géométries de la chambre d'eau des turbines et du canal d'amenée.

Pour fixer les ordres de grandeur, le Tableau 8 présente les caractéristiques des plans de grille à l'amont de turbine Kaplan fournies par THEE pour différents débits entre 5 et 150 m³/s (section d'écoulement au niveau des plans de grille et dimensionnement de la grille pour les seuls besoins de protection de la turbine). Ces caractéristiques sont évidemment susceptibles de varier selon les contraintes de chaque site et les exigences fixées.

Pour des débits turbinés de 5 m³/s à 150 m³/s, les hauteurs d'eau de la prise d'eau varient de 2.0 m à 7.5 m, et les largeurs de la prise d'eau de 3.5 m à 40 m. Les vitesses d'approche sont comprises entre environ 0.6 et 0.75 m/s pour des débits turbinés de 5 à 30 m³/s et entre 0.7 et 0.9 m/s pour des débits turbinés de 50 à 150 m³/s. Le diamètre approximatif de la turbine augmente de 1.2 m pour un débit de 5 m³/s, à 3.6 m pour un débit de 75 m³/s (Gomes et Larinier, 2008). Pour les débits turbinés supérieurs, l'option prise est d'équiper la centrale de plusieurs turbines. L'espacement libre entre les barreaux adopté pour les seuls besoins de protection de la turbine augmente avec le débit et le diamètre de la turbine, de 40 mm jusqu'à 100 mm. Ces espacements représentent entre environ 1/30 et 1/40 du diamètre des turbines. Quel que soit le cas, les degrés d'obstruction estimés des plans de grille conventionnels sont voisins de 0.2.

A titre d'exemple, le dimensionnement de prises d'eau « ichtyocompatibles » a été effectué à partir des dimensions de prises d'eau fournies par THEE (Tableau 8). On a considéré une vitesse normale maximale V_N égale à 45 cm/s, déduite à partir du critère biologique de 50 cm/s maximum et en prenant une marge d'augmentation de 10% de la vitesse normale du fait du colmatage partiel de la grille. Le dimensionnement a été réalisé pour les deux types de dispositions en considérant soit une inclinaison par rapport à l'horizontale d'un angle $\beta \leq 26^\circ$, soit une orientation par rapport à la direction de l'écoulement d'un angle $\alpha \leq 45^\circ$ (en prenant $\beta = 75^\circ$ pour des questions de dégrillage).

L'évaluation des pertes de charge a été réalisée avec la formule de Meusburger (2002) pour différents plans de grille « ichtyocompatibles » selon l'espacement libre entre les barreaux (15, 20 et 25 mm) et l'épaisseur des barreaux (6, 8 ou 13 mm ; voir paragraphe 9.3), ainsi qu'à titre de comparaison pour un plan de grille conventionnel quasi-vertical ($\beta = 75^\circ$) et dimensionné pour les seuls besoins de protection de la turbine (espacement libre et épaisseur des barreaux donnés dans le Tableau 8). Afin d'alléger la légende des graphiques par la suite, les différents types de plans de grille sont présentés dans le Tableau 7.

Plan de grille	Degré d'obstruction O	Type
Conventionnel	≈ 0.2	0
d = 6 mm et e = 25 mm	0.28	1
d = 6 mm et e = 20 mm	0.31	2
d = 6 mm et e = 15 mm	0.36	3
d = 8 mm et e = 25 mm	0.32	4
d = 8 mm et e = 20 mm	0.36	5
d = 8 mm et e = 15 mm	0.42	6
d = 13 mm et e = 25 mm	0.42	7
d = 13 mm et e = 20 mm	0.46	8
d = 13 mm et e = 15 mm	0.52	9

Tableau 7 : Type de plans de grille considéré pour l'évaluation des pertes de charge.

Cas	Q_{MAX} (m ³ /s)	N	Sous-cas	Caractéristiques de la section au niveau des grilles				Caractéristiques d'une grille conventionnel			Diamètre approximatif de la turbine D (m) (Gomes et Larinier [2008])
				H (m)	B (m)	A (m ²)	V _A (m/s)	e _{TUR} (mm)	d (mm)	O	
1	5	1	a	2.0	4.0	8.0	0.63	40	6	0.22	1.2
			b	2.5	3.5	8.8	0.57				
2	10	1	a	2.5	6.0	15.0	0.67	60	6	0.18	1.6
			b	3.0	5.0	15.0	0.67				
3	15	1	a	3.2	7.0	22.4	0.67	70	8	0.19	1.9
			b	3.9	6.0	23.4	0.64				
4	30	1	a	4.0	10.0	40.0	0.75	80	8	0.18	2.5
			b	5.0	8.0	40.0	0.75				
5	50	1	a	4.5	13.0	58.5	0.85	90	10	0.19	3.0
			b	5.5	10.0	55.0	0.91				
6	75	1	a	5.5	20.0	110.0	0.68	100	10	0.18	3.6
			b	7.5	15.0	112.5	0.67				
7	100	2	a	4.5	26.0	117.0	0.85	90	10	0.19	3.0
			b	5.5	20.0	110.0	0.91				
8	150	2	a	5.5	40.0	220.0	0.68	100	10	0.18	3.6
			b	7.5	30.0	225.0	0.67				
9	150	3	a	4.5	40.0	180.0	0.83	90	10	0.19	3.0
			b	5.5	30.0	165.0	0.91				

Q_{MAX} : Débit maximal turbiné (m³/s)

N : Nombre de turbine

H : Hauteur de la prise d'eau (en m)

B : Largeur de la prise d'eau (en m)

A : Aire de la section d'écoulement (en m²)

V_A : Vitesse d'approche (m/s)

e_{TURB} : Espacement libre entre barreaux pour les seuls besoins de protection des turbines (mm)

d : Epaisseur des barreaux (mm)

O : Degré d'obstruction global du plan de grille (y compris éléments de rigidité et de supportage)

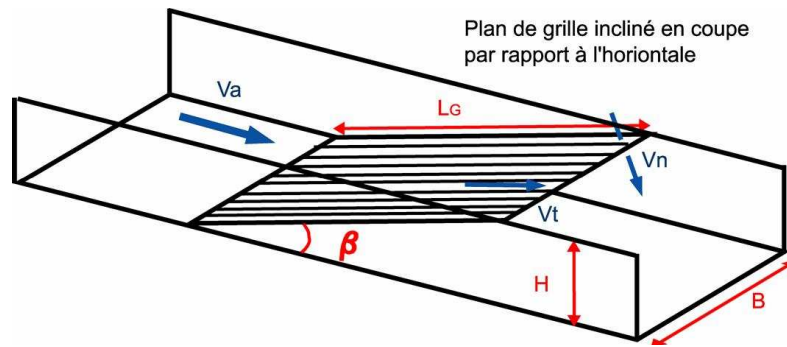
Tableau 8 : Caractéristiques des plans de grille à l'amont des turbines Kaplan de basse chute (d'après THEE).

11.2.1. Plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale (Tableau 9 et Figure 34)

Dans le cas d'un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale, les dimensions des prises d'eau permettent quel que soit le cas d'adopter l'inclinaison minimale (angle β égal à 26°), la vitesse normale maximale étant toujours respectée. Les longueurs de grille varient alors entre environ 4.5 m et 12.6 m pour des hauteurs d'eau allant de 2.0 m à 5.5 m ; elles atteignent plus de 17 m dans les deux cas 6b et 8b présentant une hauteur d'eau de 7.5 m. Les vitesses normales obtenues sont inférieures à la vitesse normale maximale et varient de 0.25 m/s (cas 1b) à 0.40 m/s (cas 7b et 9b). Les vitesses tangentielles sont dans tous les cas deux fois supérieures aux vitesses normales.

Etant donné la forte inclinaison, la longueur de grille augmente rapidement avec la hauteur d'eau. Elle dépasse notamment la dizaine de mètre pour les hauteurs d'eau supérieures à 4.5 m. Cela complique l'installation du dégrilleur à cause de la longueur du bras à déployer et du porte-à-faux qui en résulte. Par rapport aux dimensions des prises d'eau considérées, une solution consiste alors en une réduction de la hauteur d'eau au niveau du plan de grille, éventuellement compensée par un élargissement si la vitesse normale maximale n'est plus respectée.

La Figure 34 présente l'évolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage de la grille pour les différents types de grille inclinées par rapport à l'horizontale, dans plusieurs cas de prise d'eau. Les pertes de charge des plans de grille conventionnels (type 0) et des plans de grille « ichtyocompatibles » (type 1 à 9) sont globalement du même ordre de grandeur, l'augmentation du degré d'obstruction de la grille du fait des espacements réduits étant compensée par l'inclinaison et les plus grandes surfaces de grille. Grille propre (sans colmatage), les pertes de charge des plans de grille « ichtyocompatibles » peuvent être légèrement inférieures, égales ou légèrement supérieures à celles du plan de grille conventionnel selon les types de grille et les cas de dimensionnement. Il apparaît d'autre part que les pertes de charge augmentent plus rapidement avec le colmatage pour les plans de grille conventionnels que pour les plans de grille « ichtyocompatibles ». Cela s'explique par le fait que l'influence d'un colmatage donné sur le degré de blocage total est d'autant plus sensible que le degré d'obstruction initial de la grille est faible. Parmi les plans de grille « ichtyocompatibles », les pertes de charge augmentent avec le degré d'obstruction croissant, du type 1 au type 9. L'augmentation la plus sensible apparaît entre le type 8 ($d = 13$ mm et $e = 20$ mm) et le type 9 qui est le plus défavorable ($d = 13$ mm et $e = 15$ mm). Les graphiques d'évolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage mettent en évidence la nécessité d'asservir le système de dégrillage à une perte de charge maximale de l'ordre de 5 cm pour limiter les taux de colmatage à 20-40% maximum et éviter ainsi une augmentation des vitesses normales trop importante risquant d'induire le placage des poissons sur la grille ou leur passage au travers.



Cas	Q_{MAX} (m^3/s)	N	Sous-cas	Caractéristiques de la section au niveau des grilles				Caractéristiques des plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale				
				H (m)	B (m)	A (m^2)	V_A (m/s)	β (degrés)	L_G (m)	S (m^2)	V_N (m/s)	V_T (m/s)
1	5	1	a	2.0	4.0	8.0	0.63	26	4.6	18.3	0.27	0.56
			b	2.5	3.5	8.8	0.57	26	5.7	20.0	0.25	0.51
2	10	1	a	2.5	6.0	15.0	0.67	26	5.7	34.2	0.29	0.60
			b	3.0	5.0	15.0	0.67	26	6.8	34.2	0.29	0.60
3	15	1	a	3.2	7.0	22.4	0.67	26	7.3	51.1	0.29	0.60
			b	3.9	6.0	23.4	0.64	26	8.9	53.4	0.28	0.58
4	30	1	a	4.0	10.0	40.0	0.75	26	9.1	91.3	0.33	0.67
			b	5.0	8.0	40.0	0.75	26	11.4	91.3	0.33	0.67
5	50	1	a	4.5	13.0	58.5	0.85	26	10.3	134	0.37	0.77
			b	5.5	10.0	55.0	0.91	26	12.6	126	0.40	0.82
6	75	1	a	5.5	20.0	110.0	0.68	26	12.6	251	0.30	0.61
			b	7.5	15.0	112.5	0.67	26	17.1	257	0.29	0.60
7	100	2	a	4.5	26.0	117.0	0.85	26	10.3	267	0.37	0.77
			b	5.5	20.0	110.0	0.91	26	12.6	251	0.40	0.82
8	150	2	a	5.5	40.0	220.0	0.68	26	12.6	502	0.30	0.61
			b	7.5	30.0	225.0	0.67	26	17.1	514	0.29	0.60
9	150	3	a	4.5	40.0	180.0	0.83	26	10.3	411	0.37	0.75
			b	5.5	30.0	165.0	0.91	26	12.6	377	0.40	0.82

Q_{MAX} : Débit maximal turbiné (m^3/s)

N : Nombre de turbine

H : Hauteur de la prise d'eau (en m)

B : Largeur de la prise d'eau (en m)

A : Aire de la section d'écoulement (en m^2)

V_A : Vitesse d'approche (m/s)

β : Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale (degrés)

L_G : Longueur du plan de grille (m)

S : Surface du plan de grille (m^2)

V_N : Vitesse normale au plan de grille moyenne (m/s)

V_T : Vitesse tangentielle au plan de grille moyenne (m/s)

Tableau 9 : Dimensionnement de plans de grille inclinés en coupe par rapport à l'horizontale pour différents cas de prises d'eau entre 5 et 150 m^3/s .

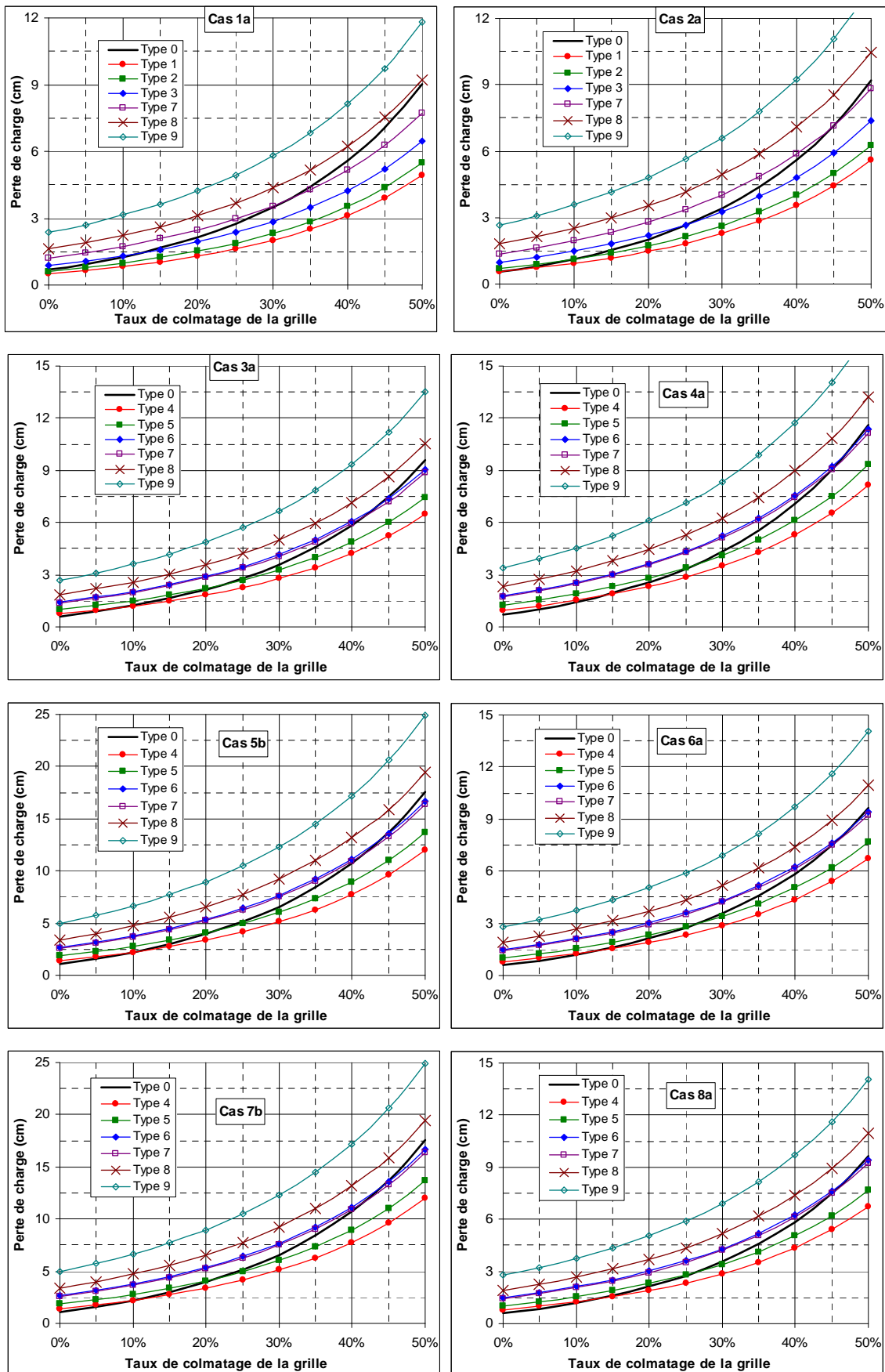


Figure 34 : Evolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage de la grille pour les différents types de grille inclinées par rapport à l'horizontale, dans plusieurs cas de prise d'eau.

11.2.2. Plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement (Tableau 10 et Figure 36)

L'installation d'un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement dans les dimensions des prises d'eau considérées amène à adopter une orientation plus prononcée que le minimum biologique dans plusieurs cas (4, 5, 7 et 9) afin de respecter la vitesse normale maximale. Dans ces cas, l'angle α est d'autant plus faible que la vitesse d'approche est forte (jusqu'à 31°). Les largeurs de plan de grille varient de 5.0 m pour une largeur de prise d'eau de 3.5 m, à près de 75 m pour une largeur de prise d'eau de 40 m (cas 9a). Par rapport aux dimensions des prises d'eau considérées, une solution consiste alors à élargir la prise d'eau de façon à réduire les vitesses d'approche à des valeurs de l'ordre de 0.65-0.7 m/s, et ainsi pouvoir adopter une orientation à 45°. Les vitesses normales obtenues sont dans tous les cas égales à la valeur maximale (0.45 m/s).

La Figure 36 présente l'évolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage de la grille pour les différents types de grille orientées par rapport à la direction de l'écoulement, dans plusieurs cas de prise d'eau. Les pertes de charge des différents plans de grille « ichtyocompatibles » (type 1 à 9) sont globalement similaires quel que soit le type, l'effet négatif du degré d'obstruction étant compensé par un effet positif de redressement de l'écoulement. Elles se révèlent par contre très nettement supérieures à celles induites par les plans de grille conventionnels, ce qui peut compromettre la faisabilité de cette disposition, en particulier au niveau d'aménagements à faible chute. L'écart est d'autant plus important que l'orientation du plan de grille est prononcée ; il augmente de plus avec le taux de colmatage.

Pour limiter l'augmentation des pertes de charge, on peut envisager le recours à des formes de barreaux profilés. On peut également envisager de conserver les barreaux dans le sens de l'écoulement, malgré l'orientation générale du plan de grille. Cela est envisageable avec un assemblage des barreaux sur des peignes avec des évidements spécifiquement découpés. Ces deux solutions permettent chacune de limiter sensiblement l'augmentation des pertes de charges par rapport à un plan de grille conventionnel, voire d'obtenir des valeurs similaires lorsqu'elles sont combinées (Figure 35).

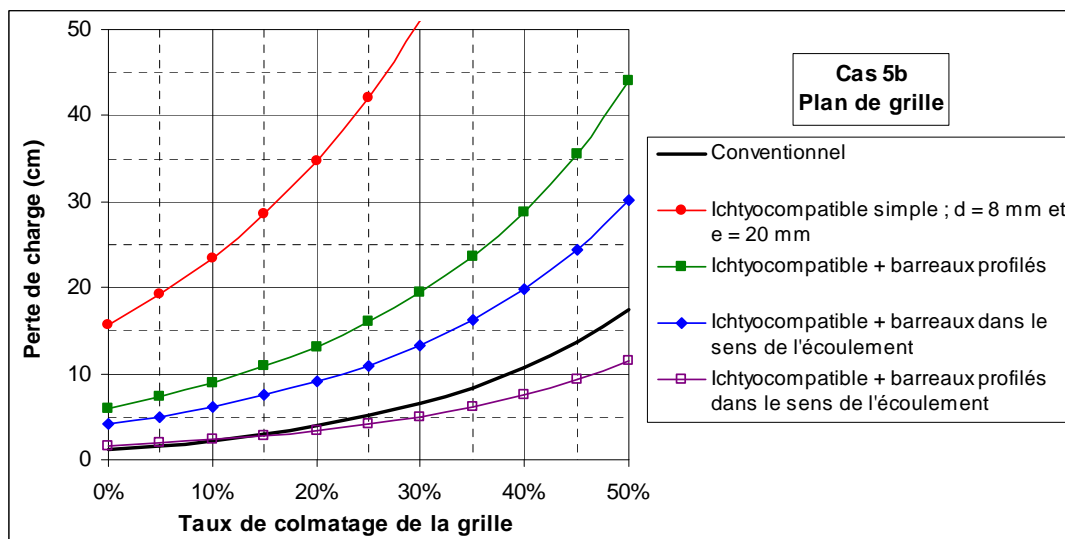
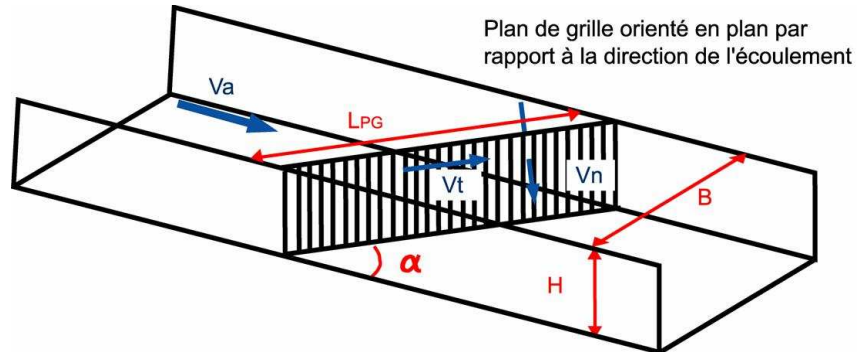


Figure 35 : Effet des différentes solutions pour limiter les pertes de charge au niveau d'un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement (cas 5b). Coefficient de forme K_F des barreaux profilés égal à 0.92.



Cas	Q_{MAX} (m^3/s)	N	Sous-cas	Caractéristiques de la section au niveau des grilles				Caractéristiques des plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement				
				H (m)	B (m)	A (m^2)	V_A (m/s)	α (°)	L_{PG} (m)	S (m^2)	V_N (m/s)	V_T (m/s)
1	5	1	a	2.0	4.0	8.0	0.63	45	5.7	11.3	0.44	0.44
			b	2.5	3.5	8.8	0.57	45	5.0	12.4	0.40	0.40
2	10	1	a	2.5	6.0	15.0	0.67	42	8.9	22.2	0.45	0.49
			b	3.0	5.0	15.0	0.67	42	7.4	22.2	0.45	0.49
3	15	1	a	3.2	7.0	22.4	0.67	42	10.4	33.3	0.45	0.50
			b	3.9	6.0	23.4	0.64	45	8.5	33.3	0.45	0.46
4	30	1	a	4.0	10.0	40.0	0.75	37	16.7	66.7	0.45	0.60
			b	5.0	8.0	40.0	0.75	37	13.3	66.7	0.45	0.60
5	50	1	a	4.5	13.0	58.5	0.85	32	24.7	111	0.45	0.73
			b	5.5	10.0	55.0	0.91	30	20.2	111	0.45	0.79
6	75	1	a	5.5	20.0	110.0	0.68	41	30.3	167	0.45	0.51
			b	7.5	15.0	112.5	0.67	42	22.2	167	0.45	0.49
7	100	2	a	4.5	26.0	117.0	0.85	32	49.4	222	0.45	0.73
			b	5.5	20.0	110.0	0.91	30	40.4	222	0.45	0.79
8	150	2	a	5.5	40.0	220.0	0.68	41	60.6	333	0.45	0.51
			b	7.5	30.0	225.0	0.67	42	44.4	333	0.45	0.49
9	150	3	a	4.5	40.0	180.0	0.83	33	74.1	333	0.45	0.70
			b	5.5	30.0	165.0	0.91	30	60.6	333	0.45	0.79

Q_{MAX} : Débit maximal turbiné (m^3/s)

N : Nombre de turbine

H : Hauteur de la prise d'eau (en m)

B : Largeur de la prise d'eau (en m)

A : Aire de la section d'écoulement (en m^2)

V_A : Vitesse d'approche (m/s)

α : Angle d'orientation en plan par rapport à la direction de l'écoulement (degrés)

L_{PG} : Largeur du plan de grille (m)

S : Surface du plan de grille (m^2)

V_N : Vitesse normale au plan de grille moyenne (m/s)

V_T : Vitesse tangentielle au plan de grille moyenne (m/s)

Tableau 10 : Dimensionnement de plans de grille orientés en plan par rapport à la direction de l'écoulement pour différents cas de prises d'eau entre 5 et 150 m^3/s .

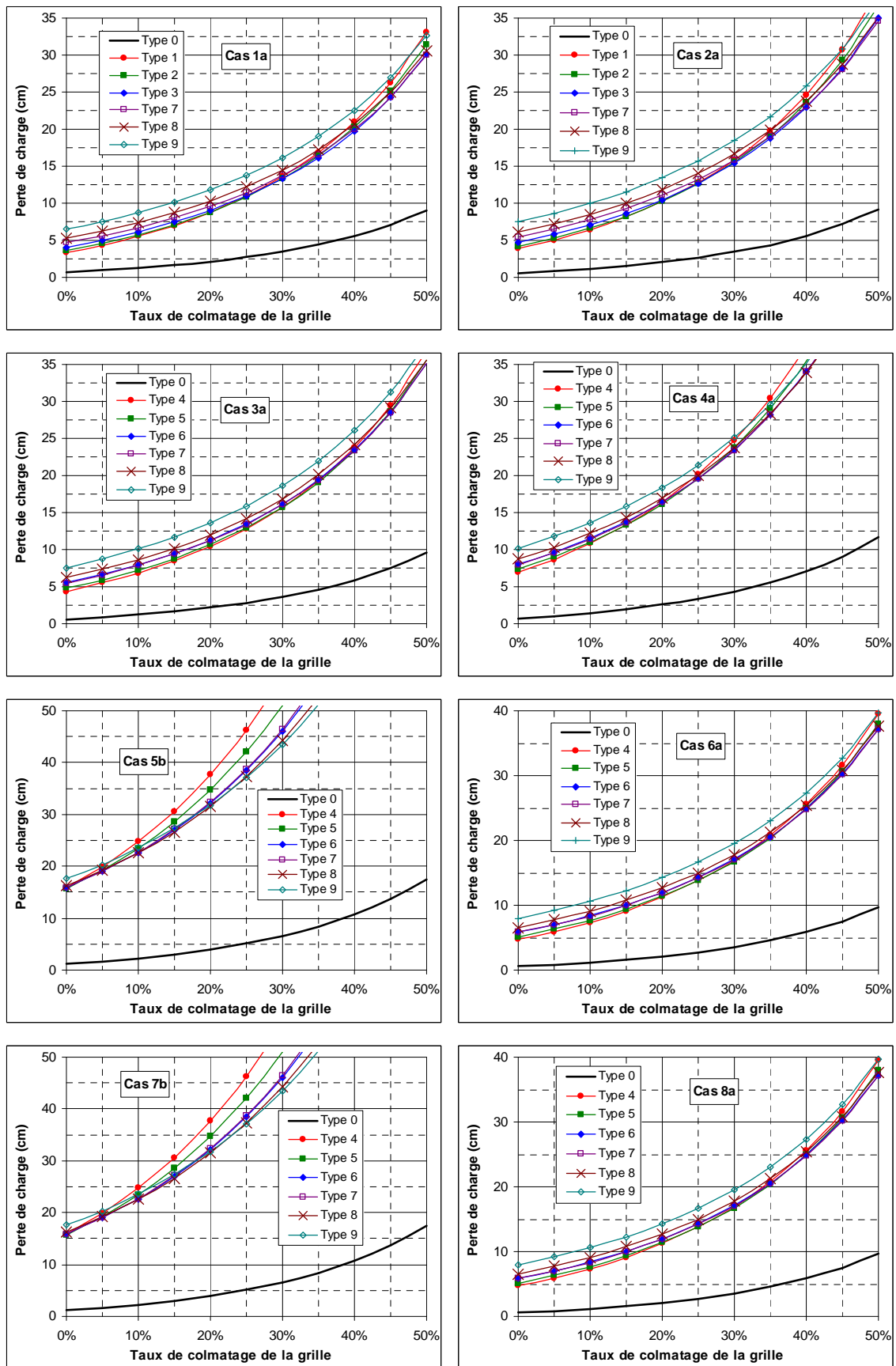


Figure 36 : Evolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage de la grille pour les différents types de grille orientées par rapport à la direction de l'écoulement, dans plusieurs cas de prise d'eau.

11.3. Discussion

Parmi les deux configurations envisageables, suite à l'exercice de dimensionnement précédent, il semble préférable d'adopter un plan de grille incliné par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à la direction de l'écoulement, cette disposition n'induisant a priori pas d'augmentation des pertes de charge par rapport à un plan de grille conventionnel et étant favorable à un certain autonettoyage de la grille. La faisabilité de cette configuration au niveau des prises d'eau profondes est cependant compliquée en terme de dégrillage, étant donné les longueurs de bras du dégrilleur à déployer et les questions de porte-à-faux qui en résultent. On aura donc intérêt à limiter la profondeur de l'écoulement au niveau du plan de grille.

La mise en œuvre de plans de grille quasi-verticaux et orientés par rapport à la direction de l'écoulement reste envisageable, en particulier au niveau des prises d'eau profondes ou à fortes variations de niveau. Vis-à-vis des pertes de charge, on aura intérêt à adopter l'orientation minimale à 45° et à éviter les orientations plus prononcées. Pour ce faire, la vitesse d'approche ne doit pas dépasser 0.65-0.7 m/s, ce qui va parfois nécessiter de modifier les dimensions des prises d'eau (élargissement ou approfondissement). D'autre part, pour limiter voire éviter l'augmentation des pertes de charge par rapport à un plan de grille conventionnel, on peut envisager d'avoir recours à des formes de barreaux profilés et/ou assembler la grille en conservant les barreaux dans le sens de l'écoulement. Dans cette configuration une attention devra être portée à la question du courant transversal auquel sera soumis la partie immergée du dégrilleur.

Quelle que soit la configuration, l'évolution des pertes de charge en fonction du taux de colmatage met en évidence la nécessité d'asservir le système de dégrillage à une perte de charge maximale de l'ordre de 5-10 cm pour limiter autant que faire se peut les taux de colmatage à 20-40% maximum et éviter ainsi une augmentation des vitesses normales trop importante risquant d'induire le placage des poissons sur la grille ou leur passage au travers.

Jusqu'à présent, les dispositifs de dévalaison ont été généralement associés aux plans de grille existants à l'amont immédiat des entonnements vers les turbines. Une telle implantation est obligatoire lorsque la centrale est située directement sur le cours d'eau. Dans le cas d'une centrale en dérivation alimentée via un canal d'amenée, il est possible d'implanter un dispositif de dévalaison au niveau de la prise d'eau du canal (cas du Lower Saranac Project aux USA ; FERC 4114) ou éventuellement le long du canal pour profiter d'une géométrie favorable (courbure par exemple). Les réflexions sur l'implantation d'un dispositif doivent alors intégrer les considérations sur le débit de dévalaison qui peut soit « se rajouter » au débit réservé du tronçon court-circuité, soit y être inclus.

Des exemples de prises d'eau en France et à l'étranger exemplaires ou du moins remarquables vis-à-vis de la problématique sont présentés sous forme de fiche en Annexe 2.

12. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce document a permis de définir les bases de conception et de dimensionnement de prises d'eau « ichtyocompatibles » multispécifiques, deux configurations ayant été dégagées. Des critères biologiques portant sur l'espacement libre maximal entre les barreaux, la vitesse normale au plan de grille maximale et l'inclinaison ou l'orientation minimale du plan grille ont en particulier été proposés pour les smolts de saumon atlantique et de truites de mer et pour l'anguille argentée.

Ce document présente la formule d'évaluation des pertes de charge proposée récemment par Meusburger dont l'utilisation est préférable à celle des formules plus anciennes.

Les aspects de colmatage et de dégrillage des plans de grille ont été abordés. Les systèmes adaptés aux différentes configurations ont été identifiés, un système de dégrillage pour les longs plans de grille fortement incliné restant à inventer.

La démarche de dimensionnement d'un plan de grille « ichtyocompatible » a été détaillée et l'exercice a été mené à titre d'exemple dans chacune des configurations, pour plusieurs débits entre 5 et 150 m³/s, permettant de tirer des enseignements sur la faisabilité des configurations.

Cette étude a également permis d'identifier plusieurs besoins de recherches et développements sur l'hydraulique des plans de grille et l'hydrodynamique des prises d'eau auxquels les études sur modèle réduit menées au Laboratoire d'Etude Aérodynamique (LEA) de Poitiers dans le cadre du programme de R&D anguille devraient permettre d'apporter des éléments de réponse.

L'acquisition de retour d'expérience à partir de la réalisation et du suivi de projet-pilotes constitue la prochaine étape pour progresser dans la conception des prises d'eau « ichtyocompatibles ». Les tests d'efficacité biologique, en priorité sur les smolts et l'anguille argentée, par des études de marquage-recapture, de marquage-détection (PIT tag) ou de radiopistage, devront permettre de valider ou d'affiner les critères biologiques de dimensionnement, en particulier pour l'anguille argentée.

Ce document sera appelé à évoluer en intégrant les résultats des expérimentations ainsi que le retour d'expérience acquis sur les projets-pilotes.

Pour les nouveaux aménagements situés sur des cours d'eau à migrateurs (smolts de saumon atlantique et de truite de mer et/ou anguilles argentées), dans la mesure où la législation les autorise, les turbines « ichtyocompatibles » et les prises d'eau « ichtyocompatibles » apparaissent en l'état actuel des connaissances comme les deux seules solutions permettant d'éviter les mortalités au passage par les turbines et ainsi de ne pas aggraver la situation de la dévalaison (principe DCE de non dégradation de l'état existant). De plus, ces deux solutions présentent l'avantage d'être multispécifiques.

Au niveau des aménagements existants, la mise en œuvre d'une solution à la dévalaison est à étudier au cas par cas. L'installation d'une prise d'eau « ichtyocompatible » suppose généralement de modifier le plan de grille (réduction de l'espacement libre, augmentation de la surface de grille, changement de disposition), voire de modifier la prise d'eau.

13. BIBLIOGRAPHIE

- Acou A, 1999.** L'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L. 1758) : dynamique et déterminisme de la migration catadrome dans un bassin versant anthropisé de Bretagne (Frémur). Thèse de l'Université de Rennes 1.
- Aitken PL, Dickerson LH et Menzies WJM, 1966.** Fish passes and screens at water power works. Proc. Inst. Civ. Eng. 35, 29-57.
- Adam B, Schwevers U et Dumont U, 1999.** Behavioral survey of eels (*Anguilla anguilla*) migrating downstream under laboratory conditions. *Verlag Natur & Wissenschaft* 16 : 1 – 63.
- Amaral S, 2003.** The use of angled bar racks and louvers for guiding fish at FERC-licensed projects. Presented at FERC fish passage protection workshop. Alden research laboratory, Inc, Holden, MA. <http://www.fws.gov/midwest/Fisheries/streamcrossings/images/PDF/20041018094217-amaral.pdf>
- ASCE, 1995.** Guidelines for design of intakes for hydroelectric plant, American Society of Civil Engineers, New York, 469-499.
- Barnes-Williams, 1998.** Downstream fish passage monitoring studies at Stillwater hydroelectric project (FERC 4684). Prepared by Barnes-Williams for Newric Hydro.
- Bau F, Gomes P, Bordes N, Larinier M et Travade F, 2008.** Suivis par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le Gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2008). Rapport GHAAPPE RA.08.06.
- Behrmann-Godel J et Eckmann R, 2003.** A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the river Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater fish* 12, 196-202.
- Bleyker JSD, Weber LJ et Odgaard AJ, 1997.** Development of a flow spreader for fish bypass outfalls. *North American Journal of Fisheries Management* 17, 743 – 750.
- Boubée JAT et Williams EK, 2006.** Downstream passage of silver eels at a small hydroelectric facility. *Fisheries Management and Ecology* 13, 165 – 176.
- Breinig T, Chorda J et Larinier M, 2003.** Etude hydraulique de grilles Johnson de faible porosité – Application à la dévalaison des larves de Bichiques. Rapport GHAAPPE RA.03.02.
- Brown LS, 2005.** Downstream passage behavior of silver phase American eels at a small hydroelectric facility. Thesis of the University of Massachusetts Amherst. 110p.
- Brown L, Haro A et Castro-Santos T, 2007a.** Three-dimensional movement of silver-phase American eels in the forebay of a small hydroelectric facility. In : *Eels at the Edge*. Proceedings of the 2003 international eel symposium, American Fisheries Society Symposium Publication, Bethesda, Maryland.
- Brown L, Haro A et Boubée J, 2007b.** Behaviour and fate of downstream migrating eels at hydroelectric power station intakes. 6TH International Symposium on Ecohydraulics, Christchurch, NZ.
- Cada GF et Sale MJ, 1993.** Status of fish passage facilities at non federal hydropower projects. *Fisheries* 18(7), 4 – 12.
- Chanseau M, Larinier M et Travade F, 1999.** Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo Salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectriques de Bedous sur le Gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotéléométrie. *BFPP* 353/354, 99-120.
- Charles Ritzi Associates, 1993.** Report of the results of a study of effectiveness of downstream fish passage facilities at the Pine Valley hydroelectric project (FERC n°9282), Souhegan River, New Hampshire. Prepared for Earthworks, Inc.
- Chorda J et Larinier M, 1996.** Dispositif de dévalaison des poissons migrateurs à la centrale de Pointis – Etude sur modèle réduit de l'exutoire de dévalaison. *HYDRE* n°184 – GHAAPPE RA96.09.
- Croze O, Chanseau M et Larinier M, 1999.** Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. *BFPP* 353/354, 121-140.
- Croze O et Larinier L, 1999.** Etude du comportement de smolts de saumon atlantique (*Salmo Salar* L) au niveau de la prise d'eau de l'usine hydroélectrique de Pointis sur la Garonne et estimation de la dévalaison au niveau du barrage de Rodère. *BFPP* 353/354, 141-156.
- Croze O, Breinig T, Pallo S et Larinier M, 2001.** Etude de l'efficacité de tris dispositifs de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique. Usines de Guilhot, Las Rives et Campagna (Ariège). Rapport GHAAPPE RA01.07.
- DWA, 2005.** Fish protection technologies and downstream fishways – Dimensioning, design and effectiveness inspection. ISBN 3-939057-35-5. 226p.
- EIFAC / ICES, 2007.** Report of the 2007 session of the joint EIFAC / ICES working group on eels. Bordeaux, 3-7 September 2007. Draft. ISSN 0258-6096.
- Eicher GJ, 1985.** Fish passage: protection of downstream migrants. *Hydro Review* 4, 95-100.
- EPRI 1987.** Hydraulic model evaluation of the Eicher passive pressure screen fish bypass system. Prepared by Eicher associates, Inc.

EPRI, 1994. Research update in fish protection technologies for water intakes. Stone and Webster engineering corporation, Boston, Massachusetts, 225p.

EPRI, 2001a. Review and documentation of research and technologies on passage and protection of downstream migrating catadromous eels at hydroelectric facilities. EPRI, Palo Alto, CA.

EPRI, 2001b. Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at Water Intakes. EPRI, Palo Alto, CA, and Dominion Millstone Laboratories, Waterford, CT: 2001. 1005193.

EPRI, 2002. Upstream and Downstream Fish Passage and Protection Technologies for Hydroelectric Application: A Fish Passage and Protection Manual, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1005392.

EPRI, 2007. Movement Behavior of American Eel (*Anguilla rostrata*) on an Angled Louver Array at a Hydroelectric Project. Report Prepared by Kleinschmidt Associates, Inc. EPRI, Palo Alto, CA.

Ferguson JW, Poe TP et Carlson TJ, 1998. The design, development, and evaluation of surface oriented juvenile salmonids bypass system on the Columbia river. In : Fish migration and fish bypasses, edited by Jungwirth M, Schmutz S and Weiss S, Fishing news books, 281-299.

FHWA 2005. Hydraulic Design of highway Culverts », publication No. FHWA-NHI-01-020, September 2001(Revised May 2005). http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=7&id=13.

Fishtek, 2007. Fish Monitoring and Live Fish Trials. Archimedes Screw Turbine, River Dart. Phase 1 Report: Live fish trials, smolts, leading edge assessment, disorientation study, outflow monitoring. 40p. <http://www.mannpower-hydro.co.uk/research.htm>

Fishtek, 2008. Archimedes Screw Turbine Fisheries Assessment. Phase II: Eels and Kelts. 19p. <http://www.mannpower-hydro.co.uk/research.htm>

Giesecke J et Mosonyi E, 2005. Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 4 aktualisierte und erweiterte Auflage. ISBN 10-3-540-25505-2. 830p.

Gomes P et Larinier M, 2008. Etude sur la mortalité des anguilles suite à leur passage au travers des turbines Kaplan – Etablissement de formules prédictives. Rapport GHAAPE RA.08.01.

Gosset C et Travade F, 1999. Etude des dispositifs d'aide à la migration de dévalaison des salmonidés : barrières comportementales ? *Cybiu* 1999, 23(1), 45-66.

Gosset C, Travade F, Durif C, Rives J, Garaicoechea C et Elie P, 2002. Etude des dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée – Test de deux exutoires de dévalaison à la centrale hydroélectrique de Halsou (Nive – 64). Rapport de contrat INRA/EDF.

Haro A, Castro-Santos T et Boubée J, 2000. Behavior and passage of silver-phase American eels, *Anguilla rostrata*, at a small hydroelectric facility. *Dana* 12, 41-50.

Hecker GE et Cook TC, 2005. Development and evaluation of a new helical fish-friendly hydroturbine. *Journal of Hydraulic Engineering* 131 (10).

Heland M et Dumas J, 1994. Ecologie et comportement des juvéniles. Dans : Le saumon atlantique. Gueguen JC et Prouzet P, eds. IFREMER.

Holzner M, 1999. Untersuchungen zur Vermeidung von Fishschäden im Kraftwerksbereich, dargestellt am Kraftwerk Dettelbach am Main / Unter-franken – SchrR. Landesfischereiverbund Bayern 1, 224S.

Ichthyological Associates, 1999. A radio tagging evaluation of the downstream fish passage facility at the Hudson Falls project (FERC 5276) and the South Glens project (FERC 5461). Prepared for Adirondack Hydro Development Corporation.

Idel'cik IE, 1979. Mémento des pertes de charge - Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France, Paris.

Katopodis C, Ead SA, Standen G et Rajaratnam N, 2005. Structure of flow upstream of vertical angled screens in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 131, 294 – 304.

Kirschmer O, 1926. Untersuchungen über den Verlust an Rechen, *Mitteilungen Hydraulisches Institut München*, Nr 1.

Kutty MN et Saunders RL, 1973. Swimming performance of young atlantic salmon (*Salmo Salar*) as affected by reduced ambient oxygen concentration. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 30, 223-227.

Lagarrigue T, Voegtle B et Lascaux JM, 2008. Tests d'évaluation des dommages subis par les juvéniles de salmonidés et les anguilles argentées en dévalaison lors de leur transit à travers le groupe turbogénérateur VLH installé sur le Tarn à Millau – Tests de février 2008 sur des smolts de saumon atlantique. Rapport ECOGEA pour FMF.

Larinier M et Travade F, 1996. Smolt behavior and downstream fish bypasses efficiency at small hydroelectric plants in France. AIRH, deuxième symposium international sur l'hydraulique et les habitats, Ecohydraulique 2000, Québec, vol B, 891-902.

Larinier M et Travade F, 2002. Downstream migration : problems and facilities. *BFPP* 364, 181-207.

LOGRAMI, 2000. Etude du franchissement (dévalaison - montaison) du complexe hydroélectrique de Poutès-Monistrol par les saumons en 1999. Rapport LOGRAMI.

Meusbürger H, 2002. Perte de charge au niveau des grilles de prise d'eau des centrales hydroélectriques. Thèse de l'école polytechnique fédérale de Zurich. DISS. ETH n°14891. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:26261>.

- Mosonyi E, 1966.** Wasserkraftwerke, Band 1, Niederdruckanlagen, VDI Verlag, Düsseldorf.
- NAI, 1997.** Downstream passage route of juvenile Atlantic salmon and juvenile steelhead trout at the Lower Saranac hydroelectric project, spring 1996. Prepared for Consolidated Hydro Inc by Normandeau Associates Inc.
- Nettles DC et Gloss SP, 1987.** Migration of landlocked Atlantic salmon and effectiveness of a fish bypass structure at a small hydroelectric plant. North American Journal of Fisheries Management 7, 562-568.
- Nietzel DA, Abernethy CS et Lusty EW, 1991.** Evaluation of rotating drum screen facilities in the Yakima river basin, South-central Washington state. American Fisheries symposium 10, 325-334.
- NMFS, 1997.** Fish screening criteria. 13p. <http://swr.nmfs.noaa.gov/sr/fishscrn.pdf>.
- Odeh M et Orvis C, 1998.** Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North-east USA. In : Fish migration and fish bypasses, edited by Jungwirth M, Schmutz S and Weis S, Fishing news books, 267-280.
- O'Keefe N et Turnpenny AWH, 2005.** Screening for intake and outfalls : a best practice guide. Environment Agency science report SC030231. ISBN : 1-84432-361-7.
- Pankratz T, 1995.** Screening equipment handbook for industrial and municipal water and wastewater treatment. Second Edition. ISBN 1-56676-256-1.
- Peake S et McKinley RS, 1998.** A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. Canadian Journal of Fish Aquatic Sciences 55, 682-687.
- Pearce RO et Lee RT, 1991.** Some design considerations for approach velocities salmonids screening facilities. American Fisheries Society Symposium 10, 237-248.
- Rajaratnam N, Sadeque MAF et Katopodis C, 2006.** A simple method to predict flow distribution at vertical angled screens in open channels. Canadian Journal of Civil Engineering 33, 982 – 988.
- Sand O, Enger PS, Karlisen HE, Knudsen F et Kvernstuen T, 2000.** Avoidance responses to infrasound in downstream migrating eels, *Anguilla anguilla*. Environmental Biology of Fish 57, 327-336.
- Scruton DA, McKinley RS, Kouwen N, Eddy W et Booth RK, 2003.** Improvement and optimization of fish guidance efficiency (FGE) at a behavioural fish protection system for downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. River Research and Applications 19, 605-6017.
- Simmons RA, 2000.** Effectiveness of a fish bypass with angled bar rack at passing Atlantic salmon and steelhead trout smolts at the lower Saranac hydroelectric project. In : Advances in Fish Passage Technology, edited by Odeh M. American Fisheries Society.
- Solomon DJ, 1992.** Diversion and entrapment of fish at water intakes and outfalls. NRA R&D Report.
- Sonny D, Knudsen FR, Enger PS, Kvernstuen T et Sand O, 2006.** Reactions to infrasound in a lake and at the cooling water inlet of a nuclear power plant. Journal of Fish Biology 69, 735-748.
- Spangler J, 1928.** Untersuchung über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung, Mitteilung des hydraulischen Instituts der TH München, H2.
- Subra S, Gomes P, Vighetti S, Larinier M, Thellier P et Travade F, 2005.** Etude de dispositif de dévalaison pour l'anguille argentée – Comportement de l'anguille et test d'un dispositif de dévalaison à l'usine hydroélectrique de Baigts de Béarn (Gave de Pau). Rapport EDF HP-76/05/025/A. Rapport GHAPPE RA-05-03. 87p + annexes.
- Subra S, Gomes P, Vighetti S, Larinier M, Travade F et De Oliveira, 2007.** Etude de dispositif de dévalaison pour l'anguille argentée que les ouvrages hydroélectriques de Castetarbe et de Baigts de Béarn (Gave de Pau – 64). Campagne 2005. Rapport EDF H-P76-2006-03437-FR. 110p + annexes.
- Subra S, Gomes P, Bory Y, Clave D, Larinier M, Travade F et De Oliveira, 2008.** Etude du franchissement par l'anguille argentée des ouvrages hydroélectriques du Gave de Pau. Suivi par radiopistage des rythmes de dévalaison et du franchissement des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo. Campagne expérimentale 2006. Rapport EDF H-P76-2007-02606-FR. 115p + annexes.
- Taft EP, Amaral SV, Winchell FC et Sullivan CW, 1993.** Biological evaluation of a new modular fish diversion screen. Presented at the AFS bioengineering symposium in Portland, Oregon.
- Travade F, Gouyou C, De Faveri N, 1999.** Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de St Cricq sur le Gave d'Ossau. BFPP 353/354, 157-180.
- Travade F et Larinier M, 2006.** French experience with migration devices. Report of the 24TH session of the EIFAC, Mondsee, Autriche, 14-21, Juin 2006.
- Videler JJ, 1993.** "Fish Swimming" Chapman & Hall, 260 p
- Virtanen E et Forsman L, 1987.** Physiological responses to continuous swimming in wild salmon (*Salmo Salar* L) parr and smolt. Fish Physiology and Biochemistry 4, 157-163.
- Winchell F, Taft N, Cook T et Sullivan C, 1993.** EPRI's evaluation of the Elwha dam Eicher screen and subsequent design changes and hydraulic tests. Presented at the AFS bioengineering symposium in Portland, Oregon.
- Zimmermann J, 1969.** Widerstand schräg angeströmter Rechengitter, Universität Fridericana Karlsruhe, Theodor-Rhebock-Fluf3baulaboratorium, Mitteilungen Heft 157.

ANNEXE 1 : ASPECTS HYDRAULIQUES DANS LES DISPOSITIFS DE DEVALAISON

Contrôle du débit au niveau des déversoirs

La détermination du débit alloué à la dévalaison représente un enjeu majeur à la fois vis-à-vis de l'efficacité du dispositif et vis-à-vis des pertes énergétiques et financières. Le contrôle du débit d'un exutoire doit donc être réalisé de façon relativement précise. Ce contrôle s'effectue généralement au niveau d'un déversoir positionné soit au niveau même de l'exutoire, soit de préférence un peu plus en aval.

Dans le cadre des dispositifs de dévalaison, on aura préférentiellement recours à des seuils fixes ou des clapets, lorsqu'une régulation est nécessaire, de profil transversal rectangulaire et constituant si possible des déversoirs épais pour obtenir une accélération progressive des vitesses d'écoulement à l'amont. Les vannes plates induisant des gradients de vitesse intenses sont à éviter.

Les déversoirs sont dits épais lorsque la hauteur d'eau déversante h_{dev} est inférieure à environ 1.5-2 fois la longueur de la crête (et mince sinon).

Le dispositif est généralement conçu de façon à ce que le niveau d'eau à l'aval du déversoir se situe en deçà de la crête déversante, ce qui garantit un déversement dénoyé et ainsi un contrôle relativement précis du débit. Le déversement peut être l'occasion de mettre en place une chute empêchant la sortie des poissons du dispositif (chute de 50-60 cm minimum).

Au niveau d'un déversoir rectangulaire dénoyé, selon la formule de Kindsvater et Carter, le débit Q (en m^3/s) dépend du coefficient de débit μ (adimensionnel), de la largeur de déversement B (en m) et de la charge amont h_{dev} (en m), avec g l'accélération de la pesanteur ($9.81 m/s^2$) :

$$Q = \mu \times B \times \sqrt{2g} \times h_{dev}^{3/2}$$

La valeur du coefficient de débit μ dépend quelque peu de l'existence ou non de contraction latérale ou verticale. Elle reste généralement voisine de 0.4. La Figure 37 présente le débit au niveau d'un déversoir rectangulaire dénoyé ($\mu = 0.4$) en fonction de la hauteur d'eau déversante et de la largeur de déversement.

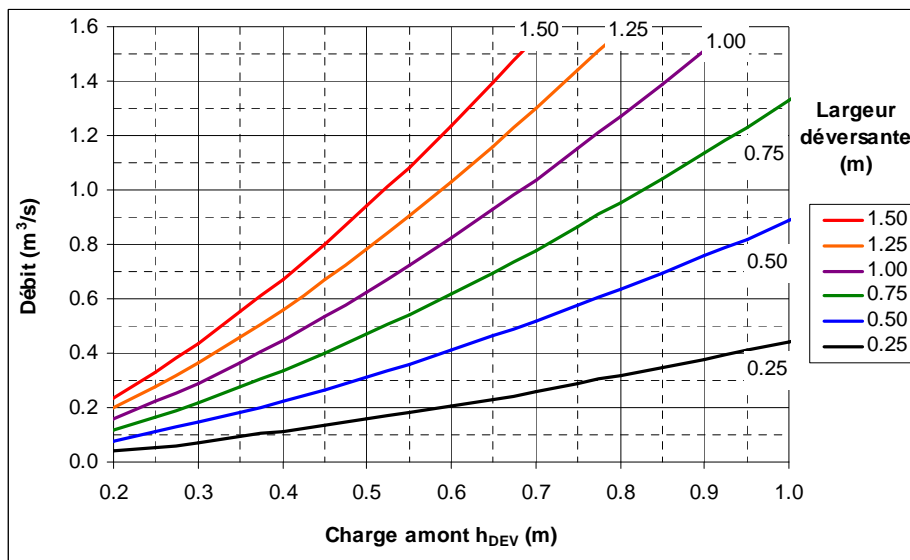


Figure 37 : Débit au niveau d'un déversoir rectangulaire dénoyé ($\mu = 0.4$) en fonction de la charge amont et de la largeur de déversement.

Dans le cadre de l'étude du dispositif de dévalaison à la centrale de Pointis sur la Garonne (Chorda et Larinier 1996), les essais sur modèle réduit ont permis de proposer un profil longitudinal de seuil épais permettant d'obtenir une accélération progressive des vitesses d'écoulement, limitée à 1 m/s/m (Figure 38). Il comporte une partie amont arrondie, puis un parement incliné en contre-pente

à 25°, suivi d'une plateforme horizontale jouant le rôle de seuil épais. Il est préconisé d'adopter un rapport L/h de l'ordre de 2, avec une valeur minimale de 1.5, ainsi qu'un rapport p/h contenu entre 1 et 2. Les essais ont donné un coefficient de débit μ égal à 0.391. Ce seuil épais, fixe dans le cas du dispositif de Pointis, peut être monté sur une vanne lorsqu'une régulation est nécessaire.

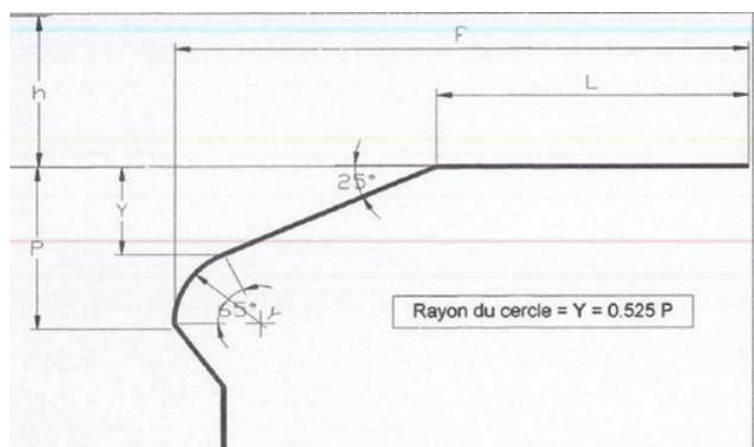


Figure 38 : Profil longitudinal du seuil épais développé pour le dispositif de dévalaison de la centrale de Pointis (Chorda et Larinier 1996).

Dans le cas le cas d'un dispositif de dévalaison avec plusieurs exutoires, le contrôle de leur débit total s'effectue généralement au niveau d'un seul déversoir positionné au bout d'une galerie collectrice. Cela pose alors la question de la répartition de ce débit entre les différents exutoires. Pour limiter les problèmes d'alimentation préférentielle d'un exutoire au détriment des autres, on cherchera à limiter les pertes de charge le long de la galerie collectrice, en lui donnant un profil hydrodynamique notamment aux jonctions avec les exutoires, et en y limitant les vitesses d'écoulement (section d'écoulement croissante au fur et à mesure que les exutoires s'y jettent).

Dispositifs d'évacuation des débits

L'évacuation du débit et des poissons s'effectue généralement par un canal ouvert ou une conduite. Un canal ouvert est préférable dans la mesure où il est moins sujet aux obstructions et d'un entretien plus facile.

Les pentes importantes données aux canaux ou conduites conduisent généralement à un écoulement en régime torrentiel (passage en régime torrentiel quasi-systématique à partir de 0.5-1.0% de pente). Le débit est alors contrôlé par la section d'entrée elle-même et non par les pertes de charge le long du canal ou de la conduite. Dans cette configuration, la Federal Highway Administration (FHWA 2005) propose des formules et des abaques pour évaluer le débit en fonction de la hauteur d'eau au niveau de l'entrée pour différentes géométries de conduites. On a reporté les abaques pour les conduites circulaires et rectangulaires en Figure 42 et Figure 43 respectivement. L'abaque pour les conduites rectangulaires s'applique également au cas de canaux ouverts, la relation entre le débit unitaire et la hauteur d'eau à l'entrée étant indépendante de la hauteur de la conduite tant que la hauteur d'eau y est inférieure. Pour un diamètre de conduite et un débit donnés, la hauteur d'eau à l'amont varie quelque peu selon les caractéristiques d'entonnement de la conduite (orientation des parois latérales, angles droits ou chanfreinés). Les résultats des formules de la FHWA se rapprochent de ceux des formules de déversoirs circulaires et rectangulaires, tant que le niveau d'eau amont ne dépasse pas le plafond de la conduite.

Pour guider le dimensionnement des canaux et conduites d'évacuation, la Figure 39 présente les évolutions de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement dans un canal ou une conduite rectangulaire (écoulement à surface libre) en fonction de la pente et du débit unitaire (coefficient de rugosité de Strickler K égal à 90). Les Figure 40 et Figure 41 présentent les évolutions du débit et de la vitesse d'écoulement moyenne dans une conduite de 0.5 m et 0.8 m de diamètre respectivement, en fonction de la pente et de la hauteur d'eau au dessus du point bas de la conduite (coefficient de rugosité de Strickler K égal à 90).

On rappelle que les vitesses dans le système de transferts vers l'aval doivent rester inférieures à une dizaine de mètres par seconde et que les surfaces intérieures et les raccords ne doivent présenter aucune aspérité.

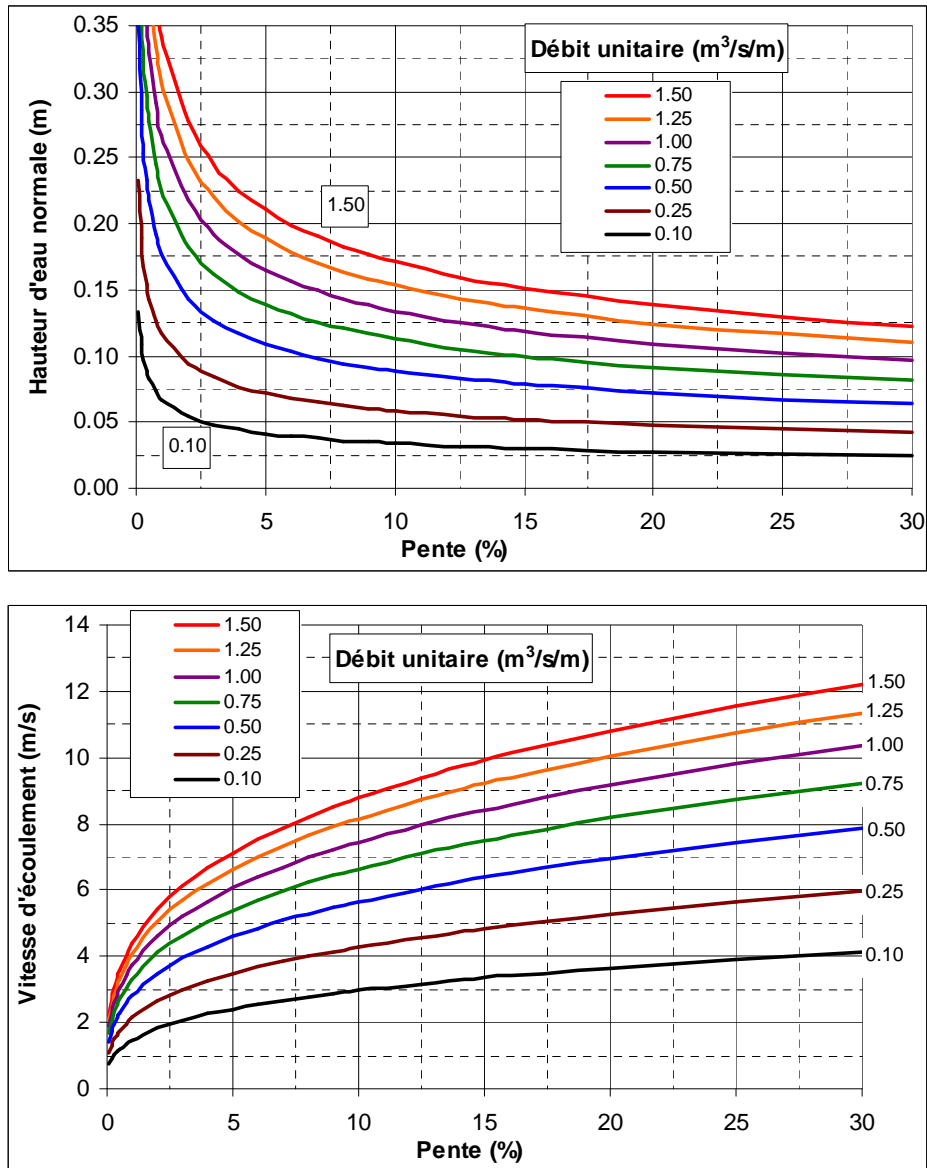


Figure 39 : Hauteur d'eau et vitesse d'écoulement moyenne dans un canal ou une conduite rectangulaire (écoulement à surface libre) en fonction de la pente et du débit unitaire (coefficient de rugosité de Strickler K égal à 90).

Conduite de 0.5 m de diamètre

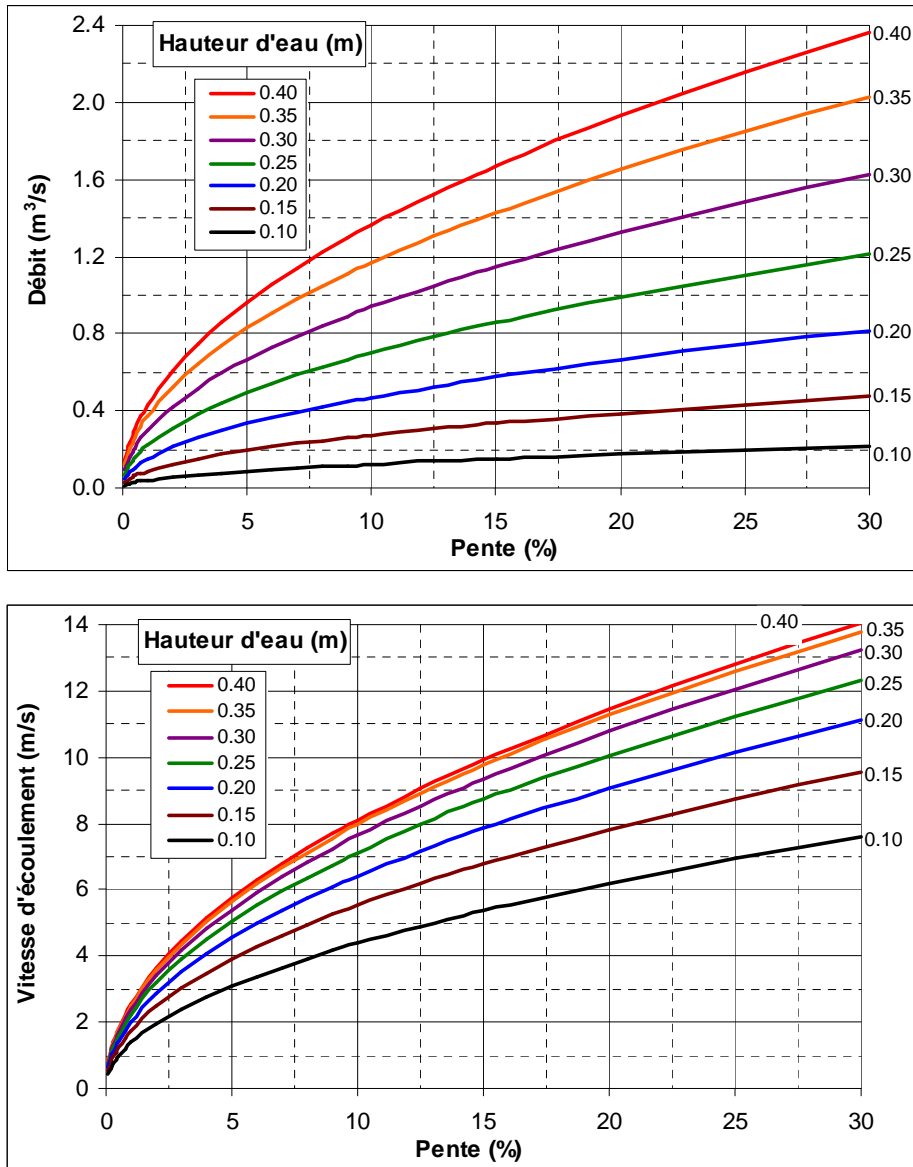


Figure 40 : Débit et vitesse d'écoulement moyenne dans une conduite de 0.5 m de diamètre en fonction de la pente et de la hauteur d'eau au dessus du point bas de la conduite (coefficient de rugosité de Strickler K égal à 90).

Conduite de 0.8 m de diamètre

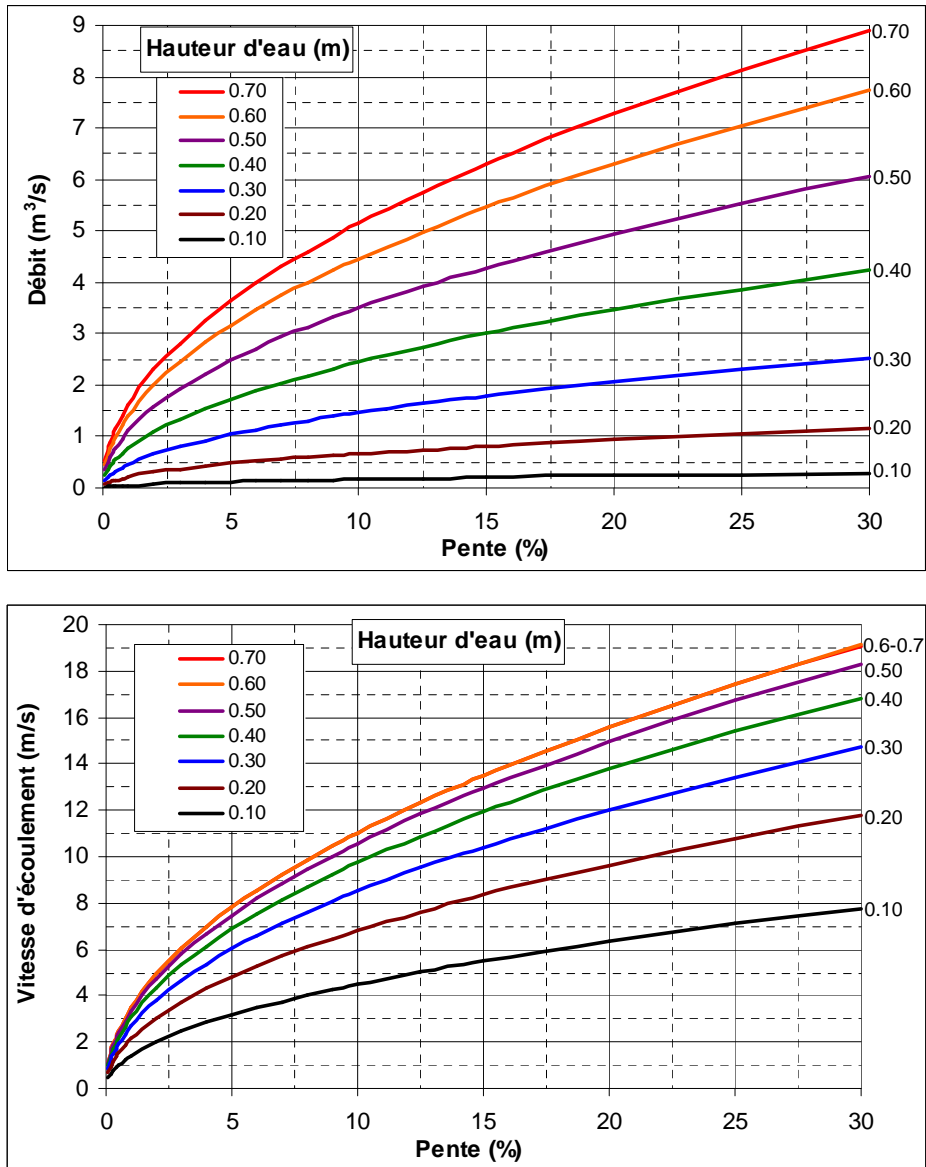
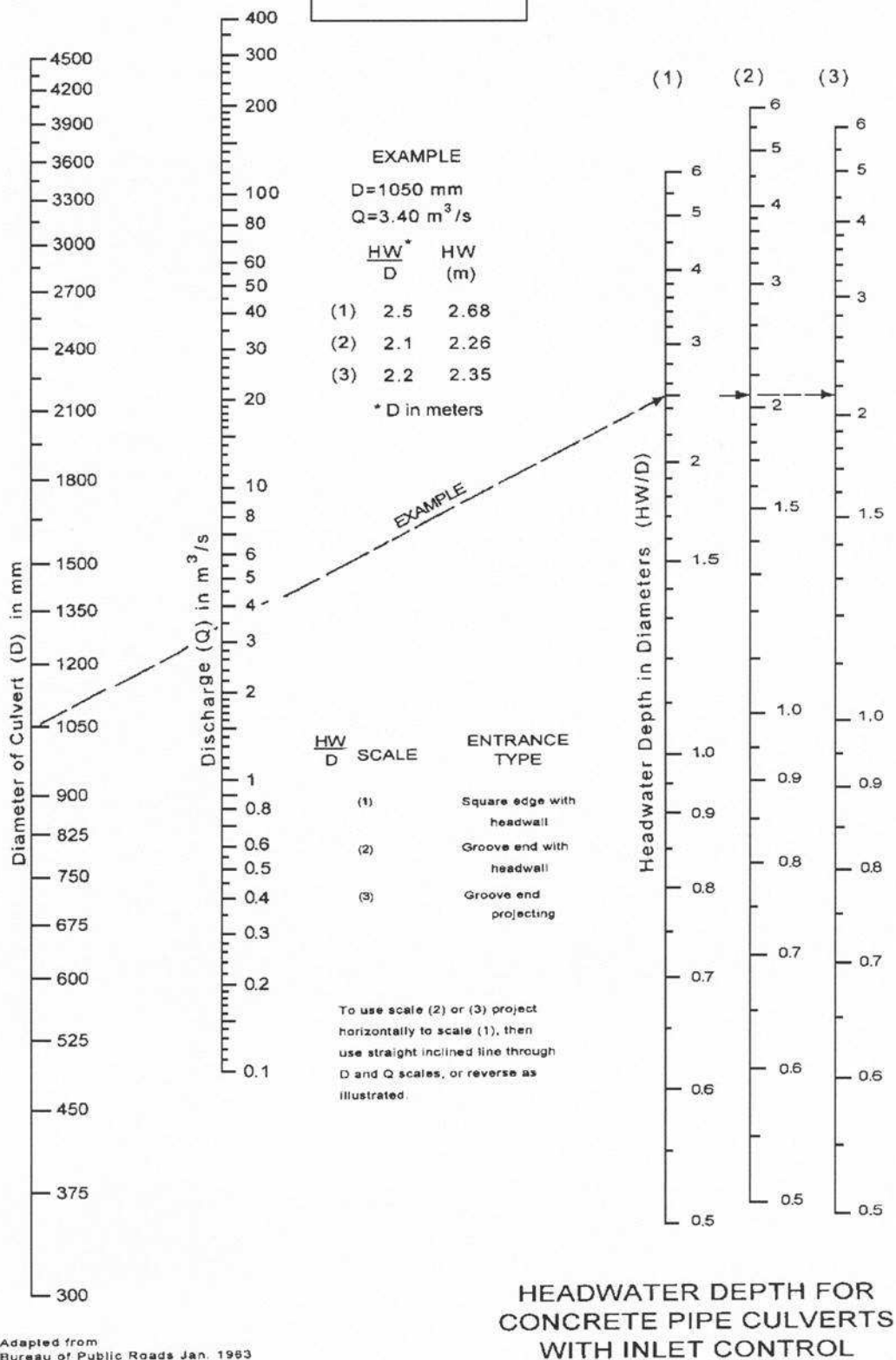


Figure 41 : Débit et vitesse d'écoulement moyenne dans une conduite de 0.8 m de diamètre en fonction de la pente et de la hauteur d'eau au dessus du point bas de la conduite (coefficient de rugosité de Strickler K égal à 90).

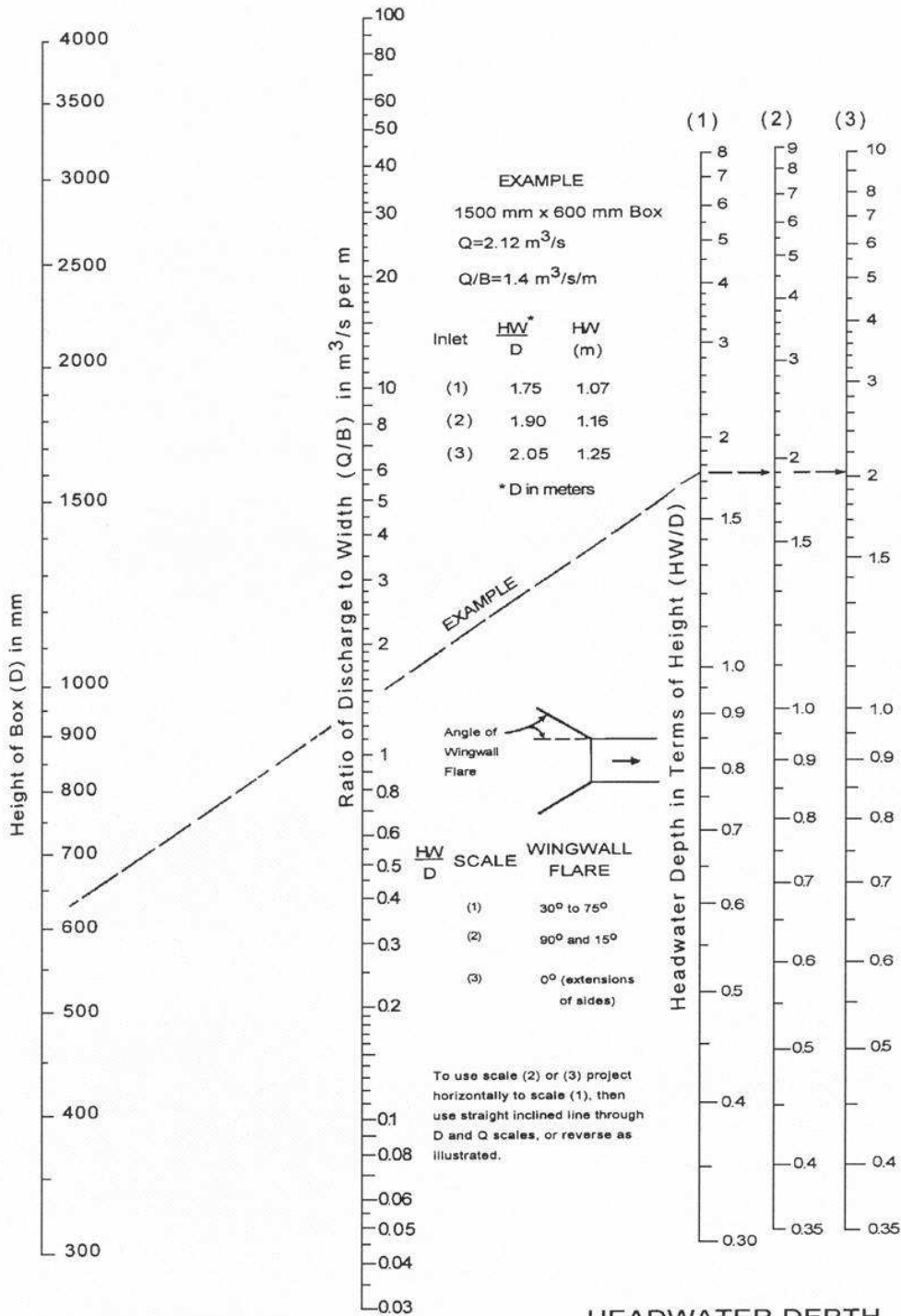
CHART 1A



Adapted from Bureau of Public Roads Jan. 1983

Figure 42 : Abaque pour le cas d'un écoulement contrôlé par l'entrée d'une conduite circulaire reliant la hauteur d'eau au dessus du point bas de la conduite, le diamètre de la conduite et le débit transité (FHWA 2005).

CHART 8A



HEADWATER DEPTH FOR BOX CULVERTS WITH INLET CONTROL

Figure 43 : Abaque pour le cas d'un écoulement contrôlé par l'entrée d'une conduite rectangulaire reliant la hauteur d'eau au dessus du point bas de la conduite, le diamètre de la conduite et le débit transité (FHWA 2005).

ANNEXE 2 : FICHES D'AMÉNAGEMENT

HIGH DAM SUR L'OSWEGO RIVER (USA)

Caractéristiques du cours d'eau et de la prise d'eau

- Cours d'eau : Oswego River (largeur moyenne 150 m).
- Débit turbiné maximum : 190 m³/s (4 groupes).
- Plan de grille :
 - vertical, orienté à 45° par rapport à l'axe du cours d'eau.
 - 65 m de long sur 6 m de profond (390 m²).
 - barreaux rectangulaires (9,5 mm x 100 mm) en plastique.
 - espacement libre entre les barreaux de 2,5 cm.
 - vitesse normale maximale de 0,5 m/s environ.
- Exutoire :
 - vannage large de 1,2 m, ouvert au fond sur 0,75 m et déversant en surface sur 1,0 m.
 - débit transité de 3,7 m³/s a minima (2% du débit turbiné).
 - transfert des poissons vers l'aval par le 5^{ème} pertuis non équipé.
- Dégrilleur à bras hydraulique commandé par un opérateur (dégrillats extraits du cours d'eau).
- Coût de construction : 2 000 000 \$ en 1994.
- Coût de maintenance entre 40 000 et 60 000 \$ par an, incluant le temps de l'opérateur et les réparations.

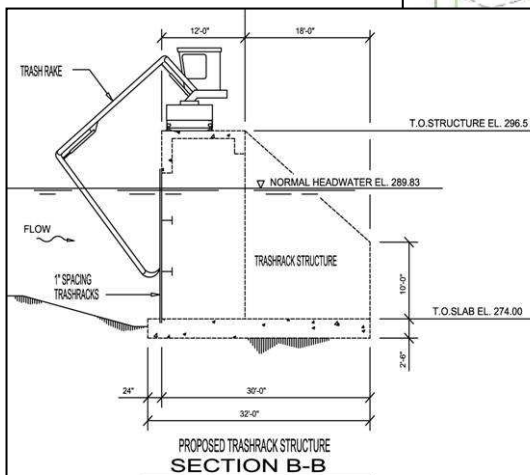
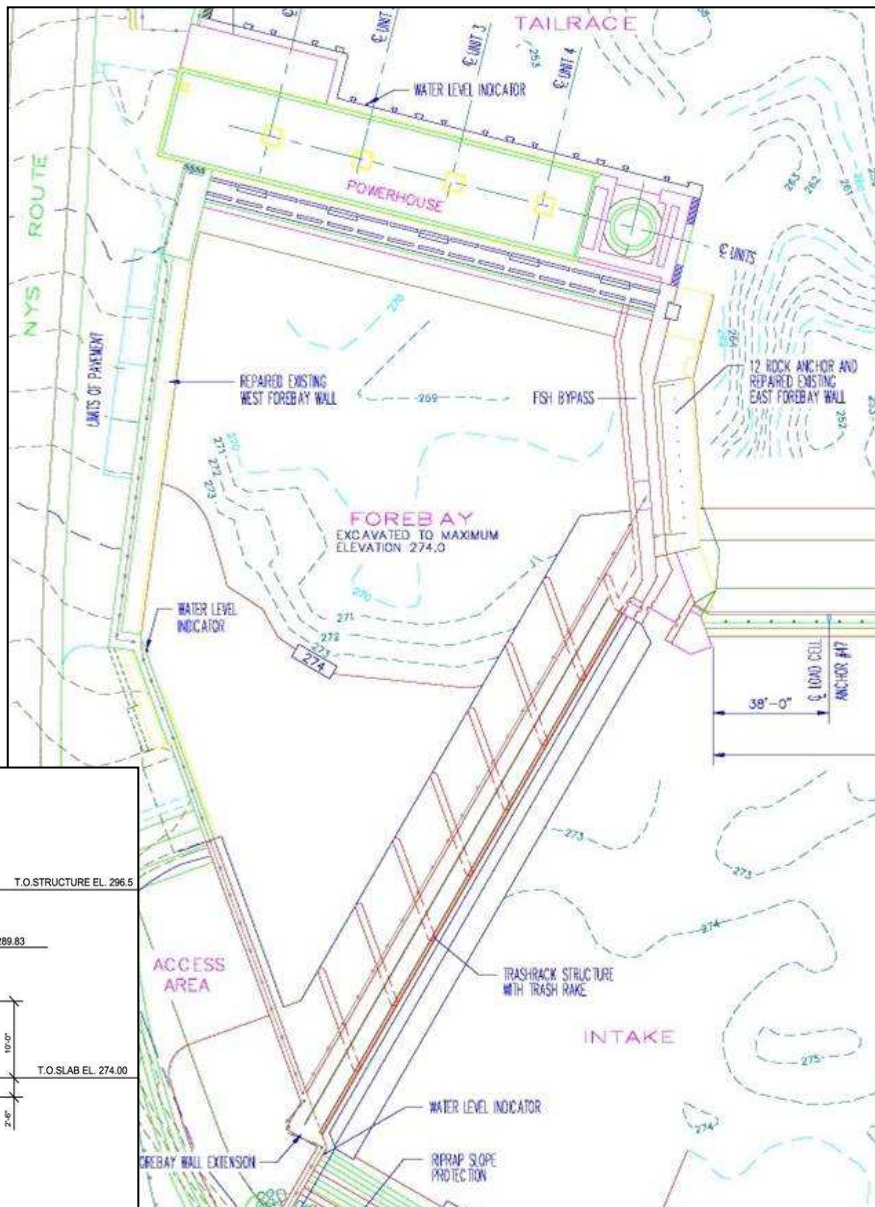
Commentaires et illustrations

Cet exemple illustre la faisabilité de dispositif de dévalaison sur de grosses prises d'eau.

Le dégrillage est effectué par un opérateur en 3 heures, ce qui se révèle trop long lors des épisodes de charge importante de débris (printemps et automne).

Le dégrillage n'est pas facilité par la position verticale de la grille et la durée importante du cycle.

Source : Robert Johnson, Oswego city.



LOWER SARANAC SUR LA SARANAC RIVER (USA)

Caractéristiques du cours d'eau et de la prise d'eau

- Cours d'eau : Saranac River.
- Débit turbiné maximum : 50 m³/s (2 groupes Kaplan).
- Plan de grille :
 - placé au niveau de l'entrée du canal d'amenée.
 - orienté à 45° par rapport à l'écoulement.
 - espacement libre entre les barreaux de 2.5 cm.
 - vitesse normale maximale de 0.6 m/s.
- Exutoire :
 - 1 exutoire de surface, protégé par une grille d'espacement entre les barreaux 20 cm.
 - depuis 1997, débit transité de 1.35 m³/s (2.7% du débit turbiné) du 16 avril au 15 juin et du 16 septembre au 15 novembre ; débit transité de 1.0 m³/s (2.0% du débit turbiné) le reste de l'année.
 - transfert des poissons vers l'aval au travers d'une conduite de 73 cm de diamètre et longue de 60 m.

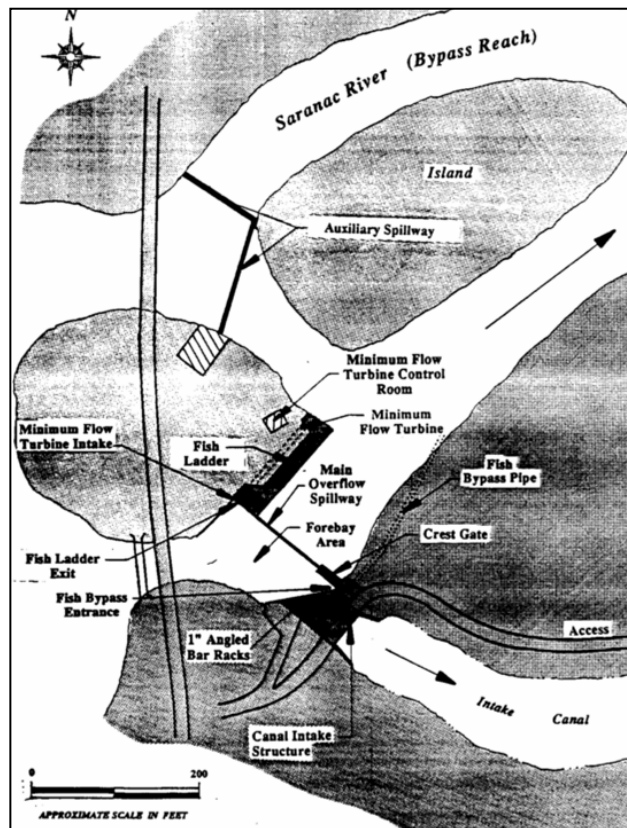
Commentaires et illustrations

En 1994 ; les premières expérimentations par radiotélémetrie ont montré des efficacités du dispositif faibles (28% pour les smolts de saumon atlantique et 42% pour les smolts de truite steelhead) alors que le débit dans l'exutoire était égal à 0.45 m³/s (0.9% du débit turbiné) et que des turbulences se développaient à l'entrée de l'exutoire. Avant les expérimentations de 1996, le débit dans l'exutoire a été augmenté à 1.0 m³/s et 1.35 m³/s (2% et 2.7% du débit turbiné) et l'entrée de l'exutoire a été retouchée de façon à limiter les turbulences et obtenir autant que possible un écoulement laminaire. L'efficacité de l'exutoire a été très nettement améliorée (Simmons 2000).

Cet exemple illustre l'importance pour l'efficacité du dispositif du débit transitant par l'exutoire et d'un entretien régulier du dispositif.

La fonctionnalité de la conduite pour transférer les poissons vers l'aval a été testée à un débit de 1.0 m³/s avec 54 smolts de saumons atlantique et 73 smolts de truites steelhead. Tous les poissons ont été récupérés en excellente condition après leur passage dans la conduite et ont survécu pendant 72H (NAI 1997).

(source Simmons 2000).



Espèce	Débit de l'exutoire	Efficacité
Smolts de truite steelhead	1.0 m ³ /s	Sur 24 truites ayant dévalé, 10 (42%) sont passées par l'exutoire, 11 (46%) à travers les grilles et 3 (12%) par les déversoirs de crues. L'efficacité de l'exutoire a été entravée périodiquement par le colmatage de l'entrée.
	1.4 m ³ /s	Sur 23 truites ayant dévalé, 19 (83%) sont passées par l'exutoire, 3 (13%) à travers les grilles et 1 non détectée.
Smolts de saumon atlantique	1.4 m ³ /s	Sur 29 saumons ayant dévalé, 28 (97%) sont passés par l'exutoire et 1 par la passe de montaison. Aucun poisson n'est passé à travers les grilles.

MICROCENTRALE RIVE GAUCHE DE BAIGTS SUR LE GAVE DE PAU

Caractéristiques du cours d'eau et de la prise d'eau

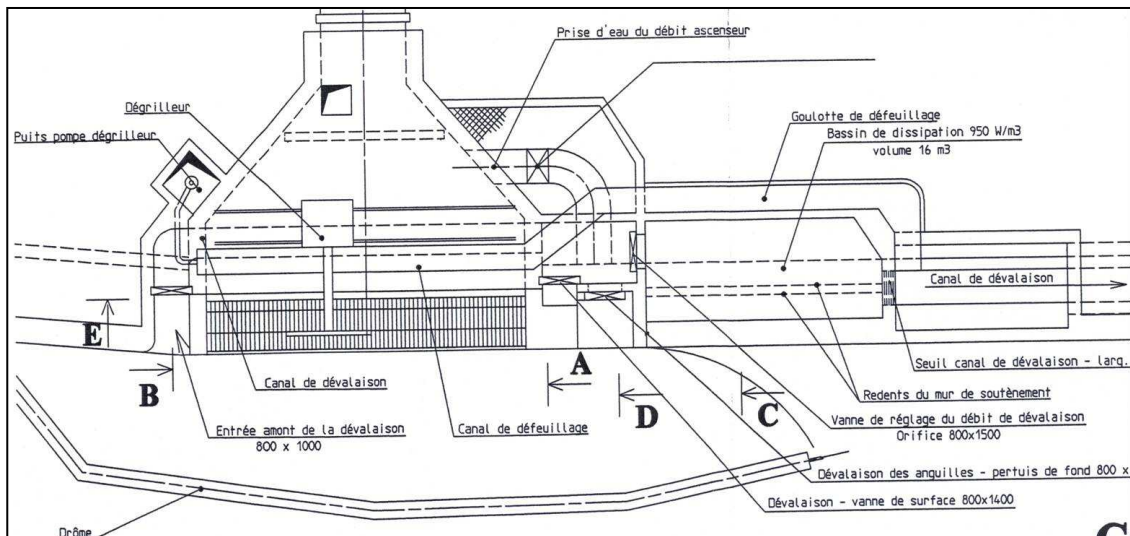
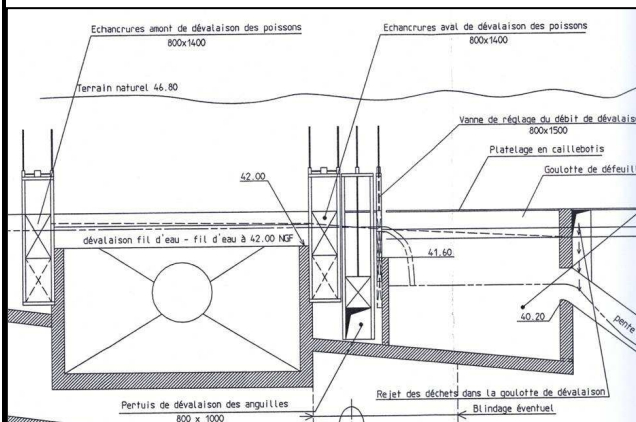
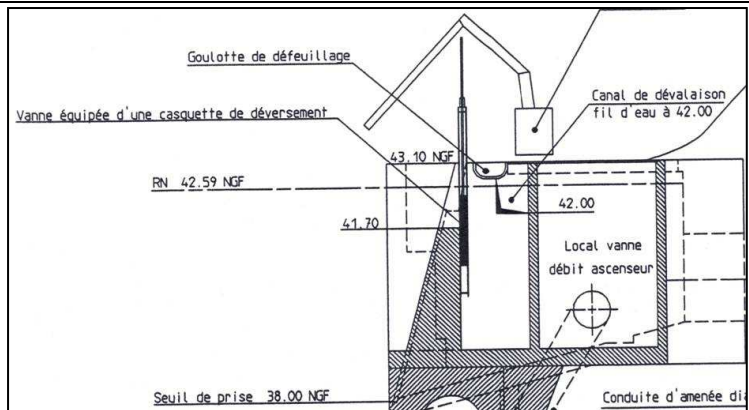
- Cours d'eau : Gave de Pau (module de 85 m³/s).
- Débit turbiné maximum de la microcentrale rive gauche : 10 m³/s (centrale turbinant déjà 90 m³/s en rive droite).
- Espèces concernées : smolts de saumon atlantique et de truite de mer et anguilles argentées.
- Plan de grille :
 - quasi-vertical ($\beta = 75^\circ$), de 7.5 m de large sur 4.6 m de long (34.5 m²).
 - espacement libre entre les barreaux de 2.0 cm.
 - vitesse normale maximale de 0.30 m/s environ.
- Exutoire :
 - 2 exutoires de surface, de 0.8 m de large chacun, ce chaque coté du plan de grille.
 - 1 exutoire de fond à droite du plan de grille.
 - Débit total transité d'environ 0.5 m³/s (5% du débit turbiné), contrôlé par une vanne à l'extrémité de la galerie collectrice.
- Entretien par un dégrilleur à bras hydraulique.

Commentaires et illustrations

Cette centrale turbine le débit d'attrait de l'ascenseur à poisson et ne doit pas induire de mortalité supplémentaire à la dévalaison.

Coté droit du plan de grille, l'exutoire de surface ou celui de fond sont ouverts alternativement selon les périodes de migration des espèces.

Source : plan EDF, photo de Subra et al , (2008).



WHITE RIVER HYDROELECTRIC PROJECT (USA)

Caractéristiques du cours d'eau et de la prise d'eau

- Cours d'eau : White River.
- Débit turbiné maximum : 56.6 m³/s.
- Espèces concernées : juvéniles de pink salmon et steelhead trout.
- Plan de grille :
 - vertical, disposé en V avec une orientation à 10° par rapport à l'axe du cours d'eau.
 - 2 fois 55 m de long environ sur 8.5 m de profond (935 m²).
 - espacement libre entre les barreaux de 2 mm, grille de type Johnson d'une porosité de 40%.
 - vitesse normale maximale de 0.06 m/s.
- Exutoire :
 - exutoire de surface positionné à l'extrémité aval du V, transition progressive avec le fond à l'aide d'une rampe.
 - déversement au niveau d'un seuil épais dans un bassin intermédiaire.
 - débit transité de 5.7 m³/s (≈ 10% du débit turbiné).
 - transfert des poissons via une conduite de 76 cm de diamètre, longue de 832 m.
- Pré-grille grossière à l'amont.
- Entretien du plan de grille fine par un système de brosse et de jets d'eau à contre-courant.

Commentaires et illustrations

L'espacement libre et la vitesse normale ont été définis selon les besoins de protection de l'espèce la plus exigeante, les alevins de pink salmon, selon les critères du NMFS (1997). La conduite de transfert vers l'aval a été dimensionnée en fonction des plus gros individus à transiter, les kelts de steelhead trout (source EPRI 2002).

