

Rétablissement de la migration du poisson

Exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques en Suisse



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Rétablissement de la migration du poisson

Exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques en Suisse

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Werner Dönni, Claudia Beck, Matthias Mende, Lena Ninck, Armin Peter, Nils Schölzel, Alvaro Baumann Y Carmona (chap. 2, 6 et 9)

Groupe d'accompagnement

Thomas Ammann, Lukas Bammatter, Alvaro Baumann Y Carmona, Karin Gafner, Daniel Hefti, Martin Huber Gysi, Andreas Knutti, Tabea Kropf, Katharina Lange, Ricardo Mendez, Matthias Meyer, Marcel Michel, Christophe Noël

Groupe d'experts

Guntram Ebel, Clemens Gumpinger, Martin Henning, Boris Lehmann, Helmut Mader, Ueli Rippmann, Damien Sidler, Günther Unfer, Falko Wagner, Jennifer Wey

Remarque

La présente publication a été élaborée avec le soutien des membres des groupes d'accompagnement et d'experts, mais ne reflète pas systématiquement leur avis.

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2022 : Rétablissement de la migration du poisson.

Exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques en Suisse. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 2205 : 112 p.

Mise en page

Funke Lettershop AG

Photo de couverture

Barrage de la centrale hydraulique Hefti sur la Linth, à Diesbach (canton de Glarus)

© Fischwerk, W. Dönni

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-2205-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2022

Table des matières

Abstracts	6	4.3.1 Passe à fentes verticales	28
Avant-propos	7	4.3.2 Passe à bassins rugueux	32
1 Introduction	8	4.3.3 Rampe intégrale et rampe partielle	33
1.1 Contexte	8	4.3.4 Cours d'eau de contournement	35
1.2 Objectifs de la publication	8	4.3.5 Comparaison entre les cours d'eau de contournement et les ouvrages techniques de montaison	37
1.3 Exigences posées aux ouvrages de franchissement piscicole	9	4.3.6 Ascenseur à poissons	38
1.4 Traitement des incertitudes	9	4.3.7 Écluse à poissons	39
		4.3.8 Écluse à poissons avec ascenseur	40
		4.3.9 Autres ouvrages	41
		4.4 Mesures d'exploitation	45
2 Bases légales	10		
3 Principes biologiques	11	5 Dévalaison	46
3.1 Importance de la continuité	11	5.1 Protection et guidage des poissons	46
3.1.1 Périodes de migration	11	5.1.1 Barrières	47
3.1.2 Capacité de nage des poissons	12	5.1.2 Dévalaison par un by-pass	54
3.2 Espèces cibles	13	5.1.3 Dévalaison par les turbines	56
3.3 Migrations à travers les ouvrages techniques	14	5.1.4 Dévalaison par les vannes	60
3.3.1 Couloir de migration	14	5.1.5 Dévalaison par un ouvrage de montaison	61
3.3.2 Repérabilité du couloir de migration	15	5.2 Paramètres et leurs valeurs limites pour la dévalaison	63
3.3.3 Franchissabilité du couloir de migration	15	5.3 Mise en œuvre technique	63
3.3.4 Profondeur minimale du couloir de migration	15	5.3.1 Grille horizontale	63
3.3.5 Transit après le barrage	15	5.3.2 Grille à câbles / Grille à câbles électrifiés	64
		5.3.3 Grille verticale	65
4 Montaison	16	5.3.4 Bar racks et louvers	65
4.1 Repérabilité	16	5.3.5 Grille Coanda	66
4.1.1 Repérabilité à distance	16	5.3.6 Bac de levage	67
4.1.2 Emplacement de l'entrée	17	5.3.7 Systèmes de by-pass	67
4.1.3 Courant d'attrait et dotation	20	5.3.8 Vis sans fin	69
4.1.4 Angle d'entrée	22	5.4 Solutions opérationnelles	70
4.1.5 Liaison avec le fond du cours d'eau	22		
4.1.6 Variations de débit et de niveau d'eau, situation dans la zone d'entrée	22	6 Garantie de fonctionnement	71
4.1.7 Conception de l'entrée	24	6.1 Périodes de fonctionnement	71
4.2 Franchissabilité	24	6.2 Entretien	71
4.2.1 Dimensionnement géométrique	24		
4.2.2 Conditions hydrauliques	24	7 Suivi des effets	73
4.2.3 Lumière	26		
4.2.4 Sortie	26	8 Démantèlement	74
4.2.5 Variations de débit et de niveau d'eau, situation dans la zone de sortie	27		
4.3 Réalisation technique	27	9 Proportionnalité	75
		9.1 Principe	75
		9.2 Évaluation	75
		9.2.1 Adéquation (réalisation de l'objectif)	76

9.2.2	Rapport coût-bénéfice	76
9.2.3	Caractère raisonnable	76
<hr/>		
10	Principes de planification	77
<hr/>		
11	Bibliographie	78
<hr/>		
12	Glossaire	86
<hr/>		
13	Annexe	88

Abstracts

During their life cycle, fish migrate upstream and downstream along watercourses. Maintaining a longitudinal continuum is an important factor in the survival of fish populations. This publication outlines the problem and contains a number of recommendations to ensure that fish migration is re-established alongside hydropower plants. It indicates the key elements to be considered for the construction of upstream and downstream fish passes and describes some actual structures which represent examples of best practice. The target groups for this publication are the cantonal authorities and parties supervising the construction of fish passes.

Lors de son cycle de vie, le poisson effectue des migrations vers l'amont et vers l'aval le long des cours d'eau. Le maintien de ce continuum longitudinal constitue une condition déterminante pour la survie des populations piscicoles. Le présent document explicite la problématique et contient une série de recommandations visant à rétablir la libre migration du poisson au droit d'ouvrages hydroélectriques. Il focalise l'attention sur les éléments clés à prendre en considération lors de la construction d'un ouvrage de franchissement et présente quelques réalisations concrètes qui peuvent être considérées comme des exemples de «best-practice». Ce document est destiné aux autorités cantonales ou aux tiers chargés d'accompagner la construction d'un ouvrage de franchissement.

Im Laufe seines Entwicklungszyklus unternimmt der Fisch auf- und abwärts gerichtete Wanderungen entlang von Fließgewässern. Die Sicherstellung eines longitudinalen Kontinuums ist eine wichtige Bedingung für das Überleben der Fischpopulationen. Die vorliegende Publikation erläutert die Problematik und enthält eine Reihe von Empfehlungen, um die Wiederherstellung der Fischwanderung bei Wasserkraftwerken zu gewährleisten. Sie zeigt die Schlüsselemente auf, die beim Bau von Auf- und Abstiegshilfen zu berücksichtigen sind, und beschreibt einige konkrete Realisierungen, die als Beispiele einer «best-practice» dienen können. Zielpublikum der vorliegenden Publikation sind die kantonalen Behörden sowie Dritte, welche den Bau von Auf- oder Abstiegshilfen zu begleiten haben.

Durante il suo ciclo di sviluppo un pesce scende e risale più volte i corsi d'acqua. La garanzia di una continuità longitudinale è una condizione essenziale alla sopravvivenza delle popolazioni di pesci. La presente pubblicazione illustra la problematica e presenta una serie di raccomandazioni volte a garantire il ripristino della libera circolazione dei pesci nei pressi di centrali idroelettriche. Inoltre, indica gli elementi chiave di cui tenere conto nella costruzione di scale di risalita e di discesa e presenta alcuni progetti già realizzati che possono essere considerati come «best practice». La pubblicazione è destinata alle autorità cantonali e ai terzi incaricati di accompagnare la costruzione di tali opere.

Keywords:

fish migration, upstream migration, downstream migration, longitudinal continuum, check-list, best-practice, recommendation

Mots-clés :

montaison, dévalaison, migration du poisson, passe à poissons, dispositif de franchissement, centrales hydrauliques, best-practice

Stichwörter:

Fischaufstieg, Fischabstieg, Fischwanderung, Fischpass, Fischaufstiegshilfe, Kraftwerke, best-practice

Parole chiave:

migrazione dei pesci, risalita dei pesci, discesa dei pesci, continuità longitudinale, check-list, best-practice, raccomandazioni

Avant-propos

La législation fédérale sur la protection des eaux vise avant tout à garantir une protection intégrale des eaux et de leurs multiples fonctions, ainsi que leur exploitation durable par l'homme. La modification de la loi fédérale sur la protection des eaux poursuit ce même objectif : trouver des solutions pour protéger les eaux tout en respectant à la fois les impératifs de protection et les besoins d'utilisation. Le Parlement a adopté cette modification en décembre 2009 sous forme de contre-projet à l'initiative populaire « Eaux vivantes », qui a ensuite été retirée.

Consacrées à la renaturation, les révisions de la loi fédérale et de l'ordonnance sur la protection des eaux, entrées en vigueur respectivement le 1^{er} janvier et le 1^{er} juin 2011, posent un nouveau jalon en matière de protection des eaux en Suisse. En effet, elles ont pour but de revaloriser les écosystèmes que forment les cours d'eau et les étendues d'eau, afin de les rapprocher de l'état naturel et de contribuer ainsi à la conservation de la biodiversité. En d'autres termes, il s'agit de redonner plus d'espace aux cours d'eau sévèrement endigués et d'atténuer les effets néfastes de l'exploitation de la force hydraulique. L'aide à l'exécution « Renaturation des eaux » doit permettre d'assister les cantons dans l'application des nouvelles dispositions légales et garantir une application du droit fédéral uniformisée et coordonnée à l'échelle suisse. Subdivisée en modules, elle couvre les divers aspects de la renaturation des eaux dans les domaines suivants : revitalisation des cours d'eau et des étendues d'eau, zones alluviales, rétablissement de la migration des poissons et du régime de charriage, assainissement des éclusées et coordination des mesures de gestion des eaux.

Dans certains domaines, des documents supplémentaires ainsi que des exemples tirés de la pratique pouvant servir de base à la renaturation des eaux sont publiés par l'Office fédéral de l'environnement dans sa série « Connaissance de l'environnement ». Cette publication met à jour l'état des connaissances sur les mesures pour garantir la migration piscicole aux abords des installations électriques et remplace la publication « Migration du poisson vers l'amont et vers l'aval à la hauteur des ouvrages hydroélectriques. Check-list Best Practice » de 2012. Les exigences techniques sont résumées afin de permettre la planification et la mise en œuvre de mesures aussi efficaces que possible. Des exemples pratiques récents sont également présentés dans le but de fournir un aperçu des différents types de solutions qui peuvent être mises en œuvre.

Stephan Müller, division Eaux
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

1 Introduction

1.1 Contexte

En Suisse, la libre migration du poisson est gênée par quelque 2000 ouvrages liés à l'utilisation de la force hydraulique et par des contraintes d'exploitation dans les tronçons à débit résiduel et à éclusées. Les planifications cantonales pour l'assainissement de la migration du poisson à la hauteur des ouvrages hydroélectriques ont établi qu'à la fin de l'année 2014 la circulation des poissons vers l'amont (montaison) se trouvait considérablement entravée par environ 700 installations, dont 15 % seulement étaient dotées d'un ouvrage efficace de franchissement. Parmi les plus de 700 installations faisant considérablement obstacle à la circulation des poissons vers l'aval (dévalaison), près de 100 % avaient besoin d'être assainies (Bammatter et al. 2015). À la hauteur de ces installations, les obstacles à la libre migration du poisson doivent être éliminés d'ici à 2030 au plus tard. Environ 45 % des installations dont l'assainissement est nécessaire se trouvent dans des eaux à truites (et partiellement à chabots) et environ 55 % dans des eaux à peuplement piscicole mixte (Zaugg et al. 2017). Puisque même une installation dotée d'un ouvrage de franchissement optimum demeure une atteinte à la libre migration du poisson, il convient de toujours considérer sa déconstruction comme une option possible lors d'un projet d'assainissement.

Des ouvrages de montaison sont construits en Suisse depuis l'entrée en vigueur de la première loi fédérale sur la pêche, datant du 18 septembre 1875, dont l'art. 5 exigeait des propriétaires d'usines hydrauliques qu'ils prennent « des dispositions pour permettre aux poissons de remonter le courant ». Ainsi, on recensait déjà 72 ouvrages de montaison au printemps 1917, dont la majorité se situaient sur des grands cours d'eau (Härry 1917). Le même article de loi exigeait des propriétaires qu'ils établissent « les constructions nécessaires pour que les poissons ne puissent s'engager dans les appareils ». Comme la réalisation d'ouvrages de dévalaison est à l'inverse très récente, les expériences pratiques avec ce type de systèmes sont limitées.

1.2 Objectifs de la publication

Comme la publication suisse de référence parue en 2012 (« Migration du poisson vers l'amont et vers l'aval à la hauteur des ouvrages hydroélectriques. Check-list Best practice », Hefti 2012) n'avait pas vocation à constituer un mode d'emploi exhaustif, elle s'est bornée à exposer la problématique sous une forme succincte. La présente publication actualise et complète celle de 2012 sur les « pratiques exemplaires ». Elle fait le point sur l'état actuel des connaissances et définit des directives pour la planification, mais elle ne constitue aucunement un manuel pour la construction d'ouvrages de franchissement piscicole. Des instructions détaillées servant à dimensionner de tels ouvrages sont disponibles dans les manuels de référence sur lesquels s'appuie la présente publication (p. ex. BMLFUW 2012, DWA 2016, Ebel 2018, ONEMA 2014, Seifert 2016). Quelques principes de planification sont également exposés au chapitre 10.

La construction d'un ouvrage de franchissement piscicole vise à assurer la mise en réseau des habitats de part et d'autre d'un obstacle¹. Considérant les connaissances et les techniques actuelles, cette publication définit les bases nécessaires à de telles réalisations et en montre l'importance. Les connaissances actuelles sur les ouvrages de franchissement piscicole se réfèrent principalement à des installations hydroélectriques de moyenne et de grande taille. En principe, les exigences définies valent aussi pour les installations de petite taille, même si tous les paramètres ne sont pas pertinents et si d'autres dispositions s'appliquent en partie. Dans tous les cas, il convient de développer des solutions spécifiques, proportionnées et adaptées au site.

¹ Un ouvrage de franchissement aménagé de manière quasiment naturelle peut avoir pour fonction secondaire la création d'un nouvel habitat. Mais cette création doit se faire en premier lieu grâce à des revitalisations au niveau du cours d'eau principal.

1.3 Exigences posées aux ouvrages de franchissement piscicole

Pour être fonctionnel, un ouvrage de franchissement doit être facile à repérer et à passer. Au vu de l'importance du comportement migratoire dans la préservation des populations, cela signifie que les poissons doivent pouvoir trouver un *couloir de migration* à tout moment et sans perte de temps significative, y entrer facilement et le passer rapidement sans se blesser. Ce principe est valable pour chaque *couloir de migration* et chaque ouvrage de franchissement.

Pour être facile à repérer et à passer, un ouvrage de franchissement doit respecter les spécifications minimales de plusieurs paramètres. Ces paramètres individuels définis sous forme de valeurs limites sont présentés dans les tableaux des chapitres suivants et sont décrits en partie dans le texte. Si ces exigences ne sont pas respectées, il faut s'attendre à ce que la fonctionnalité de l'ouvrage s'en trouve limitée. En règle générale, compenser une valeur limite non respectée en dépassant excessivement une autre valeur limite ne permet pas d'atteindre l'objectif visé.

Les valeurs limites fixées dans la présente publication doivent être respectées. Elles peuvent être légèrement dépassées tout au plus pour un petit nombre de paramètres². Le dimensionnement concret doit en principe s'effectuer sur la base de valeurs non critiques (valeurs de dimensionnement). Cela signifie que pour tenir compte des incertitudes liées aux calculs hydrauliques, à l'exécution des travaux et aux possibles influences liées à l'exploitation (p. ex. corps flottants), il convient d'intégrer dès la planification des coefficients de sécurité destinés à garantir le respect des valeurs limites (voir les détails fournis dans DWA 2016). Comme les ouvrages à construire viennent généralement s'intégrer dans les installations existantes, l'espace disponible est souvent limité. Dans ce cas, un léger écart par rapport aux valeurs limites est possible. Tout écart par rapport à une valeur limite doit toutefois être justifié de façon systématique.

La planification et la construction d'un ouvrage de franchissement piscicole ainsi que le suivi des effets requièrent une expertise biologique et technique et une bonne connaissance du terrain. Pour cette raison, la mise en œuvre doit être réalisée par des experts compétents et expérimentés, spécialisés dans les domaines de la biologie des poissons et de l'aménagement des cours d'eau, en étroite collaboration avec les services cantonaux en charge de la pêche.

1.4 Traitement des incertitudes

Un ouvrage de franchissement est un couloir complexe en trois dimensions, exposé à des conditions hydrauliques qui fluctuent dans le temps et dans l'espace. Pour être optimal, son aménagement doit reposer sur une parfaite compréhension de la façon dont les poissons utilisent ce passage pour leur migration³ et des propriétés qu'ils en attendent. Pour quelques paramètres, les connaissances sont encore très lacunaires, par exemple pour le débit de dotation minimal, l'optimisation du *courant d'attrait* et le comportement des poissons dans les courants turbulents. Cela tient à la rareté des résultats de recherche et des suivis. Les connaissances disponibles concernent pour l'essentiel les *salmonidés* et les anguilles. Comme les valeurs limites définies dans la présente publication sont éprouvées par une pratique de longue date, il convient de les respecter dans la mesure du possible.

² Les planifications qui ont été achevées avant la parution de cette publication et dont les mesures ont été élaborées sur la base des règles de dimensionnement proposées dans Hefti (2012) n'ont pas à être alignées sur les présentes valeurs limites.

³ Le terme « migration » désigne ici tous les types de déplacements des poissons.

2 Bases légales

La loi fédérale du 21 juin 1991 sur la pêche (LFSP, RS 923.0) exige l'imposition de mesures propres à assurer la libre migration du poisson (art. 9, al. 1, let. b) et à empêcher que les poissons et les écrevisses ne soient tués ou blessés par des constructions ou des machines (art. 9, al. 1, let. d). Cette exigence concerne les installations nouvelles et existantes (art. 10) et comprend des mesures applicables à l'ensemble des espèces et des stades de développement en présence, aussi bien à la montaison qu'à la dévalaison.

Les cantons veillent à ce que les mesures en vertu de l'art. 10 LFSP soient réalisées jusqu'au 31 décembre 2030 (art. 9c de l'ordonnance du 24 novembre 1993 relative à la loi fédérale sur la pêche [OLFP, RS 923.01]). Les coûts liés à la planification, à la mise en œuvre et au suivi des effets des mesures nécessaires dans le cadre de l'assainissement d'un ouvrage hydroélectrique pour garantir la libre circulation des poissons sont indemnisés sur la base de l'art. 34 de la loi du 30 septembre 2016 sur l'énergie (RS 730.0).

En vertu de l'art. 83b, al. 3, de la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20), les cantons présentent tous les quatre ans à la Confédération un rapport sur les mesures mises en œuvre.

3 Principes biologiques

3.1 Importance de la continuité

La connectivité et la continuité sans restriction des cours d'eau sont d'une importance écologique primordiale pour les poissons. En Suisse, seules 19,7 % des espèces de poissons indigènes ont le statut de menace NM (non menacée, conformément à l'OLFP [2021]). Les poissons sont également menacés parce qu'ils n'ont plus accès à de nombreux cours d'eau pour migrer. Les centrales et les barrages sans aides à la migration piscicole, mais également les ouvrages transversaux non liés à la force hydraulique sont souvent difficilement, voire aucunement franchissables.

Cependant, il n'est pas rare que l'habitat d'un poisson s'étende sur des distances considérables (plusieurs kilomètres pour la truite, plus de 100 km pour le nase et le barbeau et plus de 1000 km pour le saumon, p. ex.). Les poissons migrent donc tant vers l'amont que vers l'aval. La migration ne se limite pas aux espèces *diadromes*, comme le saumon et l'anguille. Au contraire, toutes les espèces ont besoin de migrer. Généralement, les poissons changent d'habitat plusieurs fois au cours de leur cycle de vie. Les distances parcourues et la direction de la migration varient selon l'espèce et la classe d'âge, de l'œuf qui dérive au reproducteur en passant par la larve, le juvénile et l'adulte. La proportion des individus prêts à migrer peut elle aussi varier selon la classe d'âge, l'espèce et le lieu (migration partielle, Chapman et al. 2011).

La migration est déclenchée par des facteurs tant internes (p. ex. des changements dans le cycle de vie) qu'externes (environnementaux) (Lucas & Baras 2001). On constate ainsi que les causes de la migration sont diverses. Il s'agit principalement de migrations de reproduction, de recherche de nourriture ou de refuges, de migrations compensatoires et encore pour coloniser ou reconquérir des habitats. Le fitness et le maintien d'une population locale dépendent dans une large mesure de la capacité des individus à se déplacer pour rechercher de nouveaux habitats au long du cycle de vie.

Ces migrations doivent pouvoir s'effectuer sans retards considérables. L'accumulation de multiples obstacles sur une voie de migration peut fatiguer et ralentir les poissons (Williams et al. 2012) et ainsi entraîner un retard important. Il est donc essentiel pour les poissons de disposer d'un *couloir de migration* adapté, dont les propriétés géométriques et hydrauliques correspondent aux exigences physiques et comportementales des espèces concernées. À titre d'exemple, il convient de considérer la capacité de nage, la masse corporelle, mais également les exigences et les tolérances concernant les conditions hydrologiques (p. ex. turbulences) et le substrat.

Le *couloir de migration* au niveau d'un obstacle à la migration relie sans interruption le *bief aval* au *bief amont* au moyen d'un ouvrage de montaison ou de dévalaison (DWA 2016). Ainsi, il convient d'assurer un *couloir de migration* aussi bien pour la montaison que pour la dévalaison. Dans les tronçons destinés à l'exploitation de la force hydraulique, l'efficacité d'un *couloir de migration* peut en outre être influencée par le régime d'éclusées ou le débit résiduel. Une coordination des mesures d'assainissement de la migration ainsi que du régime des éclusées et des débits résiduels est nécessaire pour que la migration puisse s'effectuer sur l'ensemble du tronçon.

3.1.1 Périodes de migration

En principe, les poissons peuvent migrer à tout moment de la journée ou de l'année. Les mois de mars à novembre constituent néanmoins la principale période de migration. Au printemps, les poissons quittent leur habitat d'hiver pour les zones de frai et d'alimentation, tandis qu'en automne (de septembre à novembre) ils rejoignent leur habitat d'hiver. En règle générale, ils migrent peu en hiver. La truite et la lotte sont des cas particuliers, car elles se reproduisent en hiver (jusqu'à mars pour la lotte), tout comme l'ombre, qui commence sa migration reproductrice début mars. Ces espèces parcourent ainsi de grandes distances pendant la période hivernale. La truite s'installe souvent dans de petits affluents pour s'y reproduire. Elle retourne ensuite dans les cours d'eau principaux (de novembre à février). Le corégone, quant à lui, quitte le lac

en automne ou en hiver pour se reproduire dans l'un des grands affluents (p. ex. dans le Rhin alpin).

3.1.2 Capacité de nage des poissons

La vitesse de nage des poissons joue un rôle essentiel dans leur capacité à franchir les obstacles. La vitesse d'écoulement dans le *couloir de migration* ne doit pas empêcher les poissons de l'emprunter. La conception d'ouvrages de montaison, de *by-pass* et de barrières mécaniques (grilles) nécessite des connaissances sur la vitesse de nage des espèces aux différents stades de développement du poisson.

La vitesse de nage peut être répartie en trois catégories principales.

- **Vitesse de croisière**

Le poisson peut maintenir cette vitesse sur une longue durée (> 200 min.). Elle correspond à environ deux fois la longueur du corps du poisson (longueur totale, du museau à l'extrémité de la nageoire caudale) par seconde (fig. 33).

- **Vitesse soutenue**

La vitesse soutenue et la vitesse critique sont souvent mentionnées. La vitesse soutenue correspond à la vitesse maximale que le poisson peut maintenir pendant 200 minutes. Elle s'élève à environ cinq fois la longueur du poisson par seconde ou environ 50 % de la vitesse de sprint des *salmonidés*, *cyprinidés* ou des *percidés*. La **vitesse critique** correspond à la vitesse à laquelle un individu peut nager à contre-courant pendant un certain temps sans se faire emporter (entre 30 secondes et 60 minutes selon les études). La vitesse critique peut être interprétée comme la limite supérieure de la vitesse soutenue.

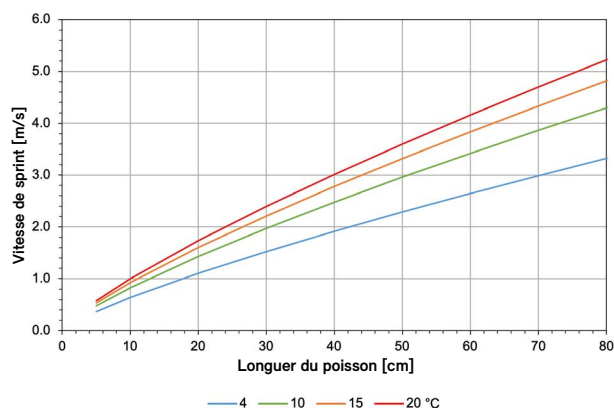
- **Vitesse de sprint**

Cette vitesse ne peut être maintenue que sur de courtes durées (10 à 20 s). Elle dépend de la longueur et de la forme du poisson, ainsi que de la température de l'eau (Pavlov 1989 ; fig. 1).

Les vitesses indiquées (en longueurs de poissons par seconde) sont des valeurs approximatives valables pour les poissons adultes de nombreuses espèces. En revanche,

Fig. 1 : Vitesse maximale des salmonidés (vitesse de sprint)

La vitesse maximale des salmonidés (vitesse de sprint) augmente avec la température de l'eau et la longueur du corps du poisson (calcul d'après Ebel [2014] pour une durée de nage de 20 secondes).



la vitesse de l'anguille et de la lamproie n'atteint que 0,5 à 4 longueurs par seconde (DWA 2016). Outre d'autres facteurs (état de santé, turbulences), la vitesse dépend principalement de la température de l'eau. Les modèles de calcul correspondants peuvent être consultés dans Ebel (2018, p. 170 ss) et Katapodis & Gervais (2016). Les petits poissons comme le chabot, la loche et le goujon (Tudorache et al. 2008), ainsi que les poissons juvéniles des espèces plus grandes (p. ex. les poissons dans leur première année de vie), appartiennent à la catégorie des poissons à **faible capacité de nage**.

La capacité d'un poisson à remonter un courant qui dépasse sa vitesse de croisière ou atteint sa vitesse critique dépend de sa motivation à migrer. De nombreux facteurs interviennent (individu, taille, espèce, raison de la migration, etc.).

Les turbulences exercent également une influence importante sur la capacité de nage des poissons, en plus de la température de l'eau. Les zones de turbulence ne sont pas systématiquement évitées et peuvent réduire la capacité de nage. Dès que la taille du tourbillon atteint ou dépasse la taille du poisson, la vitesse de croisière et la vitesse critique sont réduites (Pavlov et al. 2000 ; DWA 2016). Les individus dont la taille est proche de celle du tourbillon sont fortement affectés par la force de cisaillement (Schneider 2009). Les poissons doivent rétablir leur équilibre à l'aide de leurs nageoires pectorales dans les zones

de turbulence, ce qui augmente la résistance hydraulique et demande plus d'énergie, réduisant donc la vitesse de nage (Lupandin 2005).

L'état des connaissances actuelles ne permet pas de déterminer avec précision la distance que le poisson est capable de parcourir dans des conditions d'écoulement particulières pour se rapprocher d'un obstacle et chercher un *couloir de migration*. La vitesse critique peut cependant servir de point de référence pour les *espèces cible*.

3.2 Espèces cibles

Les *espèce cibles* sont sélectionnées parmi l'ensemble de l'ichtyofaune propre à la région, afin de couvrir le spectre des espèces présentes et potentielles. Dans tous les cas, la sélection est effectuée en fonction du cours d'eau. Les espèces halieutiques ne sont pas considérées séparément. Les *espèce cibles* sont, pour un lieu donné, les espèces qui représentent le mieux les besoins des groupes de poissons suivants (voir ci-dessous).

- **Les espèces représentatives de la zone de peuplement piscicole, les espèces spécifiques au type du cours d'eau et les espèces annexes**, qui sont propres à des types de biotope ou de biocénose définis et qui présentent des exigences en matière d'habitat et de dispersion (p. ex. les distances de migration).
- Les espèces qui présentent **les plus grands besoins en termes d'espace** pour la montaison et la dévalaison (taille du bassin, *largeur de fente*, etc.) (p. ex. le saumon, la truite lacustre, le silure). Le dimensionnement des aides à la migration piscicole est déterminé en fonction des grandes espèces. La largeur des zones d'étranglement (p. ex. la *largeur de la fente* dans l'ouvrage de montaison) doit satisfaire aux besoins de ces espèces.
- Les espèces qui présentent des **besoins particuliers en termes d'hydraulique** (espèces à faible capacité de nage, comme le chabot, le spirilin). Ainsi, à titre d'exemple, les poissons à faible capacité de nage doivent être considérés comme espèces caractéristiques au niveau des dévalaisons, et les vitesses d'écoulement en amont des

grilles doivent être maintenues dans une gamme appropriée.

- Les espèces **protégées** (espèces fortement menacées, prioritaires au niveau national ou cantonal, comme la truite lacustre ou le nase).
- Les espèces à la **biologie et au comportement particulier en ce qui concerne la migration** (p. ex. l'anguille, la lamproie).
- Les espèces cibles peuvent également inclure des espèces menacées au sens de l'OLFP, ou des espèces dites phares qui servent la cause de la protection de la nature et jouent un rôle dans la sensibilisation du public.

Une étude par PIT-tag réalisée au niveau du haut Rhin (Schwevers et al. 2019) montre que les espèces comme la brème franche et le silure, des migrateurs de courte distance, se déplacent beaucoup et peuvent donc être considérées comme des *espèce cibles*.

En ce qui concerne la dévalaison, ce sont principalement les poissons dont les populations sont menacées par la mortalité accrue due au passage des centrales hydro-électriques qui sont considérés comme *espèce cible* (Eben 2018). Il convient d'accorder une attention particulière aux espèces mobiles avec un taux de mortalité élevé lié aux turbines (p. ex. l'anguille, la truite, l'ombre, le nase, le barbeau).

Comme il n'est pas possible de considérer de manière exhaustive les classes d'âge à faible capacité de nage (poissons de moins d'un an), les individus à partir de de la classe d'âge 1+ sont pris en compte dans les *espèce cibles*.

3.3 Migrations à travers les ouvrages techniques

Le passage d'un obstacle lors de la migration peut être divisé en cinq étapes (d'après Silva et al. 2017, Castro-Santos & Haro 2010).

1. Approche de l'obstacle
2. Entrée dans l'ouvrage de montaison ou dans le *by-pass* de dévalaison
3. Passage
4. *Sortie* de l'ouvrage de montaison ou du *by-pass*
5. Éloignement de l'obstacle

Les **poissons en montaison** s'orientent dans le sens du courant. Leur comportement natatoire est complexe, car ils cherchent à tirer parti de leur environnement hydrodynamique pour économiser de l'énergie. Ils cherchent par exemple des tourbillons qui leur permettent de se maintenir dans le courant sans bouger, voire qui les propulsent vers le haut (Fish 2010). La capacité d'utiliser les fluctuations du courant pour se mouvoir en dépensant peu d'énergie dépend de l'espèce (qu'il s'agisse d'une espèce *limnophile* ou *rhéophile*), mais peut également varier d'un individu à l'autre (Bleckmann 2010). La mise en œuvre pratique de ces connaissances demeure une question d'actualité. L'approche pragmatique a démontré cependant que les poissons, pour identifier la direction de migration, ont besoin d'un « couloir d'écoulement » continu qui présente au moins la *vitesse d'écoulement rhéoactive*.

Les **poissons en dévalaison** se déplacent généralement avec la tête orientée dans le sens du courant. Cependant, dès qu'ils perçoivent un obstacle, la plupart des individus se placent face au courant (rhéotaxie positive). Ils s'approchent donc de l'obstacle avec leur nageoire caudale et s'orientent perpendiculairement à l'obstacle. Ce comportement est constaté chez de nombreuses espèces comme le barbeau, le spiralin, l'ombre, la truite, etc. Cependant, les poissons en dévalaison ne franchissent pas toujours les obstacles et peuvent passer un temps considérable à nager à proximité de la grille avec la tête orientée dans sa direction. Il existe le risque, lorsque les vitesses d'écou-

lement sont supérieures à 0,5 m/s, que les poissons se retrouvent plaqués contre la grille et incapables de s'échapper vers l'amont.

3.3.1 Couloir de migration

Le *couloir de migration* n'étant pas toujours identique au courant principal, il convient de considérer ses dimensions verticales et horizontales. Les zones que les poissons utilisent comme *couloir de migration* dépendent du débit et des vitesses d'écoulement, des turbulences ainsi que de la température de l'eau (Schneider 2009).

La plupart des poissons migrent en majorité dans les eaux courantes. Les espèces benthiques (qui vivent au fond de l'eau, p. ex. le chabot, la loche), en revanche, migrent principalement sur le fond, voire au travers des interstices (chabot). La structure du fond et son système interstitiel se révèlent alors particulièrement importants. Le fond des ouvrages de montaison doit donc être composé d'un substrat grossier et ne présenter en aucun cas d'interruptions sous forme de surface lisse. En effet, ces surfaces peuvent constituer des barrières infranchissables pour les petites espèces comme le chabot et la loche de rivière.

Un fond rugueux avec un système interstitiel marqué remplit plusieurs fonctions. Les poissons benthiques s'en servent pour se cacher près du fond. Les invertébrés benthiques et éventuellement certains petits poissons ou poissons juvéniles peuvent migrer à travers les pierres. Les plus gros poissons en montaison peuvent également bénéficier de l'effet hydraulique de la rugosité du fond (point 4.2.2).

Outre sa disponibilité, la franchissabilité (efficacité) d'un *couloir de migration*, c'est-à-dire la quantité de poissons migrants pouvant passer au travers, est déterminante. L'efficacité se compose de la repérabilité (efficacité d'attrait = proportion de poissons en migration qui trouvent l'*entrée*), de l'efficacité d'entrée (proportion de poissons qui pénètrent dans l'aide à la migration) et de la franchissabilité (efficacité de passage = proportion de poissons en migration qui traversent le *couloir de migration* après l'avoir repéré) (Bunt et al. 2012).

3.3.2 Repérabilité du couloir de migration

La repérabilité d'un *couloir de migration* joue un rôle clé, car elle représente le premier cap à franchir pour surmonter un *obstacle à la migration* et sur lequel reposent les étapes ultérieures. Dans l'ensemble, il faut concevoir minutieusement l'*entrée* d'une aide à la migration piscicole pour obtenir une repérabilité et une efficacité optimales. L'aide à la migration doit pouvoir être trouvée par toutes les espèces de poissons de toutes tailles sans effort particulier et suffisamment rapidement, même si elle représente souvent un rétrécissement du *couloir de migration* naturel (Dumont et al. 2005). Une repérabilité maximale du *couloir de migration* n'est possible que si l'obstacle peut être complètement retiré et remplacé, par exemple, par une rampe couvrant toute la largeur du cours d'eau (chap. 8). Le cas échéant, la franchissabilité reprend le dessus sur la repérabilité en tant que critère clé (point 4.2).

3.3.3 Franchissabilité du couloir de migration

En principe, la franchissabilité du *couloir de migration* doit être assurée de façon continue toute l'année (point 6.1, pas de fonctionnement intermittent).

Les dimensions à prendre en compte pour la franchissabilité du *couloir de migration* sont la longueur, la largeur et la hauteur du poisson. Étant donné que la hauteur et la largeur sont proportionnelles à la longueur, la longueur totale (du bout du museau à l'extrémité de la nageoire caudale) peut être considérée comme un paramètre incluant les trois valeurs. La conception d'aides à la migration doit se baser sur la longueur maximale moyenne des individus adultes de la plus grande espèce indigène potentiellement présente (longueur de référence). La longueur maximale possible d'une espèce n'est généralement pas prise en compte. Une liste des longueurs de référence en fonction des espèces avec les facteurs de conversion correspondants pour la largeur et la hauteur des poissons est disponible dans DWA (2016), tableau 15 (p. 117/118) ; pour la truite de rivière et la truite lacustre, voir Dönni et al. (2016) (fig. 3, p. 14). La longueur maximale moyenne des populations piscicoles pouvant varier en fonction du cours d'eau, il est possible de s'écarter de la longueur de référence lorsque la situation le justifie. Les dimensions obtenues grâce à ces données représentent les exigences minimales en termes de dimensions pour la conception du *couloir de migration*.

Un dépassement de ces valeurs peut d'ailleurs augmenter la garantie de franchissabilité du couloir.

3.3.4 Profondeur minimale du couloir de migration

La profondeur minimale requise pour la montaison s'élève à 2,5 fois la hauteur du poisson (Hp, DWA 2016) (tab. 1). Des analyses ultérieures devront démontrer si ces recommandations physiques tiennent suffisamment compte des exigences comportementales. Pour des poissons en dévalaison empruntant les *by-pass*, les dimensions de profil requises pour le bon fonctionnement des ouvrages de dévalaison (efficacité $\geq 90\%$) sont obtenues dans la littérature internationale en la matière et décrites par des modèles (Ebel 2018, p. 248 ss). Selon les résultats du modèle, la profondeur minimale autorisée de l'eau est, à titre d'exemple, de 52 cm pour la truite, 56 cm pour le barbeau et 30 cm pour l'anguille (Ebel 2018, p. 300).

3.3.5 Transit après le barrage

La phase de « transit après le barrage » débute après la montaison ou la dévalaison. Si un poisson ressort blessé ou très fatigué, son comportement ou sa survie peuvent être affectés (p. ex. risque de prédation accru).

4 Montaison

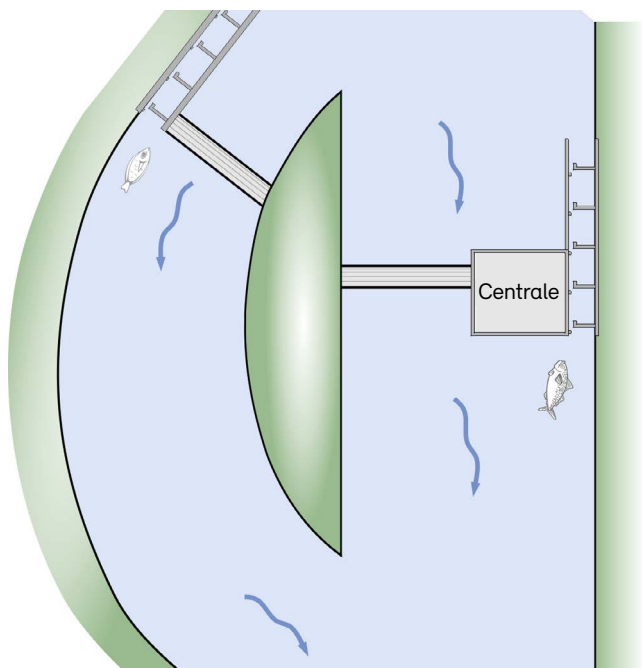
4.1 Repérabilité

4.1.1 Repérabilité à distance

La repérabilité à distance d'un *couloir de migration* est liée à son emplacement dans le système hydrographique global, à l'intérieur de la zone d'influence d'un obstacle. Les **divisions d'un cours d'eau** avec un obstacle en *sortie* – qui sont typiques des centrales avec dérivation – jouent ici un rôle particulier (fig. 2) : comme les poissons s'engagent dans chacune des divisions (bras) selon une répartition quasiment proportionnelle à l'écoulement et, probablement aussi, en fonction des préférences de courant propres à leur espèce (Adam & Schwevers 2018,

Fig. 2 : Centrale avec dérivation et tronçon à débit résiduel

Comme la distance entre le point de division des eaux et les obstacles est importante, des ouvrages de montaison sont nécessaires dans les deux bras afin d'empêcher la formation de *culs-de-sac* pour les migrants. Dans le tronçon à débit résiduel, l'ouvrage de montaison est installé du côté de la berge concave, car c'est à cet endroit qu'on peut s'attendre à trouver le plus grand nombre de poissons remontant le courant.



Adam et al. 2018), il est indispensable de garantir la continuité du *couloir de migration* dans tous les bras, au risque de créer des *culs-de-sac* (effet d'impasse) susceptibles de provoquer un retard dans la migration. Ce risque existe aussi avec les murs de séparation longitudinaux érigés entre le canal de restitution et le tronçon à débit résiduel (fig. 3), qui doivent préférentiellement être déconstruits ou rendus perméables aux poissons (présence de trous dans les murs).

On peut aussi envisager de bloquer l'accès au canal de restitution au moyen de chutes infranchissables ou de grilles fines, mais cette solution est encore peu éprouvée à ce jour et diverses installations de ce type se sont montrées inefficaces. Par exemple, une *grille verticale* inclinée dans le sens du courant, avec une hauteur de chute de 0,4 m et

Fig. 3 : Centrale au fil de l'eau avec mur longitudinal dans le bief aval

Il faut soit rendre le mur perméable aux poissons, soit installer des ouvrages de montaison des deux côtés.

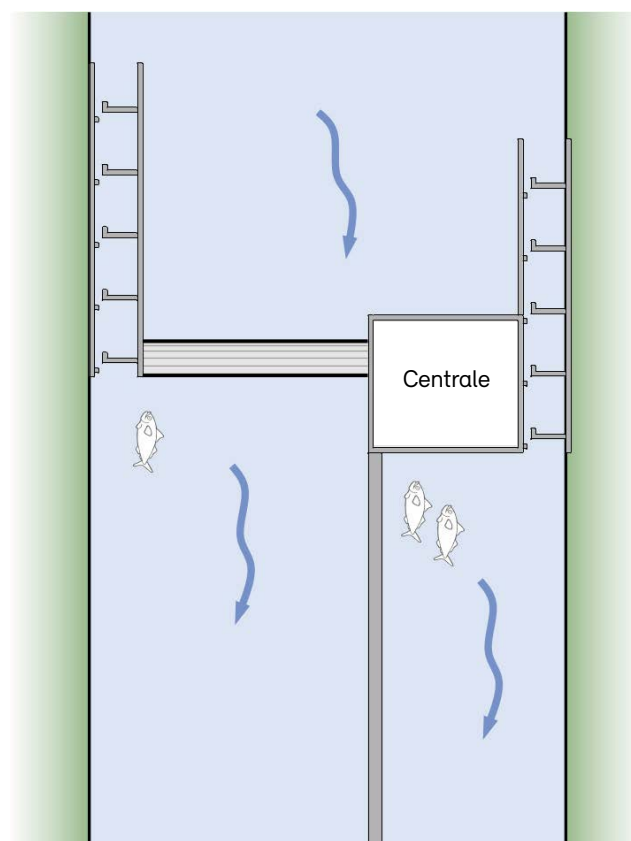
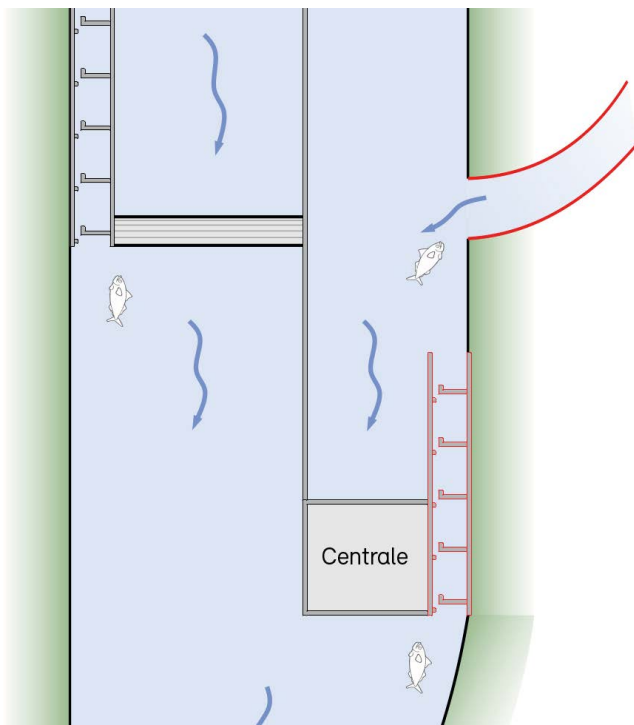


Fig. 4 : Centrale à dérivation sans canal de restitution ni tronçon à débit résiduel séparé

Lorsque l'eau prélevée par une centrale avec dérivation est restituée directement dans le tronçon à débit résiduel, on peut exclure un effet d'impasse dès lors que les poissons peuvent remonter le courant dans le tronçon à débit résiduel jusqu'au pied du barrage. Si un affluent exploitable par les poissons (en rouge) débouche dans le canal du bief amont, un ouvrage de montaison (en rouge) doit être installé au niveau de la salle des turbines.



un espacement de barres compris entre 3 et 6 cm, n'a pas suffi à empêcher des migrateurs anadromes d'entrer dans le canal de restitution d'une centrale (Adam et al. 2018) ; il semble dans ce cas que le transport de débris flottants et la déformation de la grille aient eu pour effet d'agrandir l'espacement des barres. Dans le cas des petites centrales (débit d'équipement d'environ 12 m³/s), des barrières électrifiées combinées à des vitesses d'écoulement élevées sont susceptibles de réduire le nombre de poissons pénétrant dans le canal de restitution (Wüst et Weibel 2020), mais cette solution doit encore faire l'objet de tests supplémentaires.

Si l'obstacle se trouve directement au niveau de la division du cours d'eau, par exemple s'il s'agit d'une centrale avec

dérivation sans canal de restitution (fig. 4), on peut partir du principe que les poissons vont poursuivre leur migration via le tronçon à débit résiduel, sans aucun effet d'impasse. Dans ce cas, la libre circulation des poissons dans le tronçon à débit résiduel dépend toutefois de l'existence d'un couloir de migration adapté et d'un ouvrage de montaison au niveau du barrage ; il est également crucial que les poissons à la recherche d'affluents se jetant dans le canal du bief amont ne soient pas empêchés d'y accéder ou ne soient pas obligés de faire un détour et donc de redescendre le courant après avoir passé l'obstacle (fig. 4).

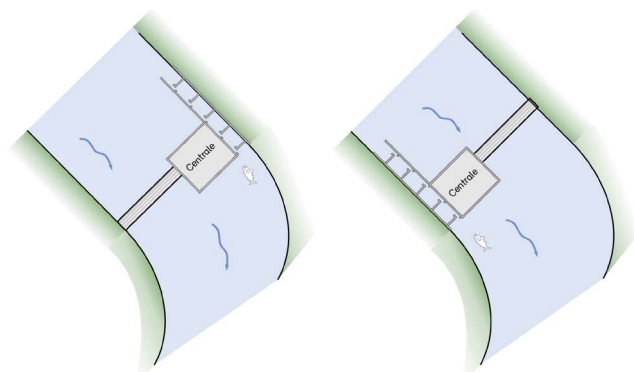
L'attrait des tronçons à débit résiduel (aussi appelés « tronçons court-circuités ») peut être amélioré par des conditions morphologiques adéquates au niveau de la restitution d'eau. Ainsi, des structures de guidage tels des épis ou des enrochements peuvent influencer les directions d'écoulement, et des rétrécissements ponctuels dans le tronçon court-circuité peuvent augmenter la vitesse du courant. Cela peut contribuer à rendre l'entrée du tronçon court-circuité plus attrayante pour des espèces rhéophiles (Seifert 2012). Il faut absolument empêcher que les poissons fassent demi-tour dans le tronçon à débit résiduel en raison de vitesses d'écoulement trop basses (tab. 2), de profondeurs d'eau insuffisantes (cf. point 3.3.4) ou de températures d'eau inadéquates ou différentes.

4.1.2 Emplacement de l'entrée

L'emplacement de l'entrée de l'ouvrage de montaison joue un rôle déterminant dans sa réparabilité et donc dans son efficacité (Clay 1995). L'entrée doit être placée là où le comportement des poissons les pousse à migrer ou à chercher un couloir de migration (Dumont et al. 2005 ; Larinier 2002). Les poissons ont tendance à suivre le courant principal, c'est-à-dire le plus gros débit arrivant sur l'obstacle (DWA 2016 ; Pavlov 1989). Ils remontent les zones du cours d'eau qui permettent une nage ciblée et efficace en vitesse de croisière. Le plus souvent, ils nagent en limite des zones à faible courant (Seifert 2012). Comme ces zones se situent principalement à proximité des berges, c'est là qu'il faut s'attendre à trouver le plus de migrateurs remontant le courant (Larinier 2002). Les poissons longent souvent la berge concave (fig. 5), mais comme toutes les espèces n'ont pas les mêmes préférences (Adam & Schwevers 2018), il faut également s'attendre à trouver des poissons le long de la berge convexe, en particulier dans les cours d'eau à peu-

Fig. 5 : Petite centrale au fil de l'eau avec largeur de cours d'eau inférieure à 50 m dans le bief aval

À gauche, l'ouvrage de montaison est installé sur la berge concave, car la plupart des poissons remontent le courant à cet endroit. À droite, l'ouvrage de montaison est exceptionnellement installé sur la berge convexe, car la centrale crée un courant dominant à cet endroit.



plement piscicole mixte en aval de la zone à truites. Dans le cas d'une centrale ou d'une restitution d'eau provoquant un courant dominant, on peut supposer que les poissons vont remonter ce courant principal, si bien qu'il faut installer l'entrée de l'ouvrage de montaison sur la berge longée par ce courant – y compris s'il s'agit de la berge convexe (fig. 5).

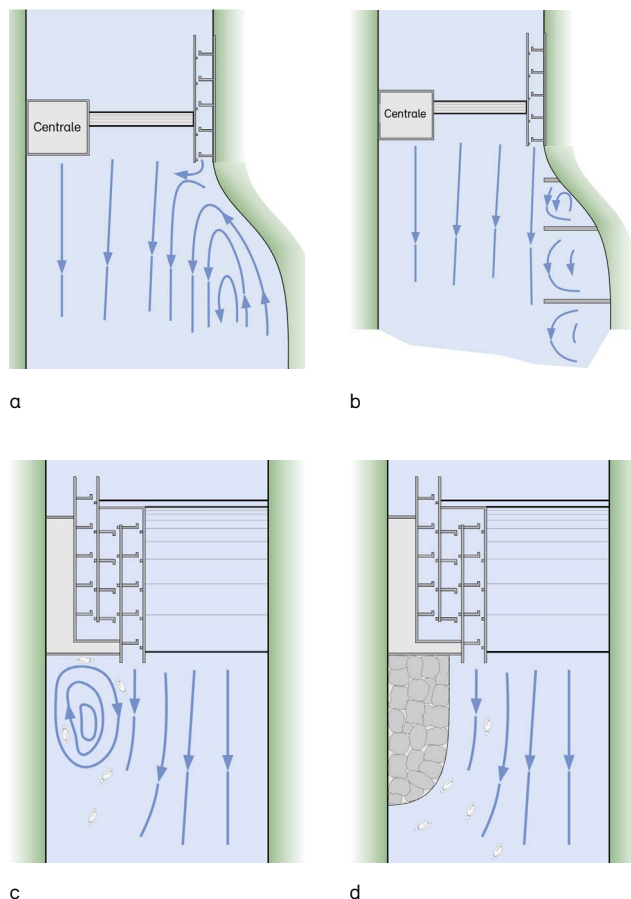
La distance jusqu'à laquelle un poisson à la recherche d'un couloir de migration s'approche d'un obstacle dépend de sa motivation, de ses capacités physiologiques et des conditions de courant dominantes (vitesse d'écoulement, turbulence, onde de couverture, etc.) (cf. point 3.1.2). Ces différents facteurs permettent de déterminer de façon théorique la **zone de recherche** (Pavlov 1989) dans laquelle le poisson peut s'attarder un certain temps avant de s'épuiser. À l'intérieur de cette zone, le poisson se déplace latéralement ainsi que dans le sens du courant pour trouver un couloir de migration adapté. Lorsqu'il est épuisé, il se laisse porter par le courant descendant ou cherche une zone de courant calme (Pavlov 1989). Le temps passé dans la zone de recherche retarde la migration du poisson.

La vitesse de nage critique des espèces cibles peut servir d'indice pour calculer la limite maximale des vitesses d'écoulement dans la zone de recherche (Pavlov 1989 ; point 3.1.2). Mais dans tous les cas, il faut procéder à une expertise de la situation sur place pour évaluer au mieux la zone de

recherche. Des simulations ou des mesures d'écoulement peuvent également s'avérer utiles, en particulier dans le cas d'une installation de grande taille ou d'un débit important. Dans le cas d'une installation de petite taille ou d'un débit peu important dans le bief aval, la zone de recherche s'étend souvent jusqu'à l'obstacle même. Une simple distance de quelques mètres entre l'obstacle ou la zone de recherche et l'entrée de l'ouvrage de montaison peut créer un effet d'impasse pour les migrateurs. Une étude éthohydrodynamique (Adam 2010 ; Adam & Schwevers 1998) en a fait la démonstration en observant que les poissons ont beaucoup plus de difficulté à trouver une entrée dont la distance à l'obstacle équivaut à 5 – 6 fois la profondeur d'eau à l'aval qu'une entrée placée directement au niveau de l'obstacle. Il est donc important que l'entrée de l'ouvrage de montaison soit placée le plus près possible de l'obstacle ou à l'extrémité supérieure de la zone de recherche.

Fig. 6 : Zones de remous

Réduction de la zone de remous grâce à des épis (a/b) ou à un remplissage (c/d) (d'après Larinier 2002, mod.).



Pour les espèces habituées aux courants forts et les grands *salmonidés*, cela signifie généralement que l'*entrée* doit se trouver directement au pied de l'obstacle. Si ces espèces habituées aux vitesses d'écoulement élevées côtoient au même endroit d'autres espèces moins bonnes nageuses ou moins grandes, il est nécessaire de délimiter une autre zone de recherche pour ces dernières et de créer une ou plusieurs *entrées* supplémentaires dans l'ouvrage de montaison. Ces *entrées* supplémentaires doivent se trouver suffisamment à l'aval pour être accessibles aux espèces avec de moindre performance de nage.

Les *entrées* d'un ouvrage de montaison ne doivent pas se trouver dans la zone d'influence d'un remous, le tourbillonnement pouvant désorienter les poissons. La formation d'un remous peut être empêchée par la construction d'épis spécialement adaptés ou par le remplissage de la zone concernée (fig. 6). S'il est impossible d'empêcher les remous dans la zone d'*entrée*, le *courant d'attrait* (cf. point 4.1.3) doit être suffisamment fort pour les briser.

De manière générale, il convient d'installer l'*entrée* de l'ouvrage de montaison en limite du courant principal (lire aussi le point 4.1.3 sur le *courant d'attrait*). Dans le cas des ouvrages hydroélectriques de moyenne ou grande taille, cet emplacement se trouve le plus souvent à la sortie des eaux turbinées ou à l'**extrémité du canal de fuite**. Comme c'est souvent à cet endroit qu'est restitué l'essentiel du débit, il faut s'attendre à y trouver des poissons remontant le courant.

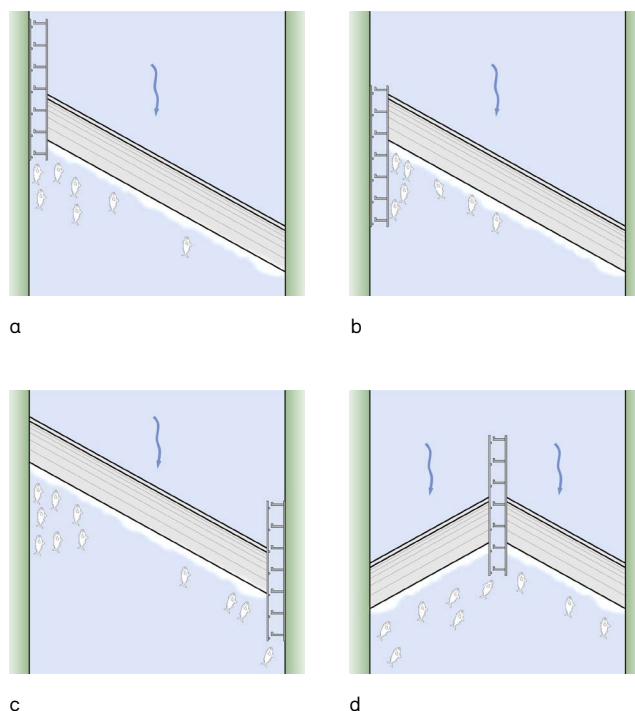
En règle générale, une *entrée* sur la berge est plus indiquée qu'une *entrée* au milieu du cours d'eau (Larinier 2002), car la plupart des poissons en montaison suivent le courant principal en longeant les berges (Dumont et al. 2005). Si le cours d'eau est large, il est en principe recommandé d'installer un ouvrage de montaison sur chacune des deux berges (Larinier 2002). À partir d'une largeur de *bief aval* de 50 m, il faut donc vérifier si un ouvrage de montaison est exploitable sur les deux berges. Cela concerne typiquement les *centrale au fil de l'eau* qui, en plus des eaux turbinées, restituent le débit principal par le barrage sur plus de 30 jours par an, ce qui provoque la formation d'un courant principal sur la berge opposée à la centrale (Larinier 1992 dans DWA 2016). Des bancs de gravier, des îlots et des obstacles bâtis (p. ex. des murs

dans le prolongement des piliers du barrage) peuvent également restreindre les déplacements latéraux des poissons devant l'obstacle. L'effet d'impasse ainsi créé peut alors nécessiter l'installation d'un ouvrage de montaison sur les deux berges (fig. 3).

Dans le cas d'un obstacle en biais par rapport à la direction d'écoulement, les poissons remontent le cours d'eau jusqu'au point le plus en amont, puis se mettent à la recherche d'un *couloir de migration* (Dumont et al. 2005 ; Larinier 2002) pour autant que la restitution d'eau ou la surverse soit suffisante à cet endroit. Dans ce cas, l'*entrée* de l'ouvrage de montaison doit être placée dans l'angle le plus en amont (fig. 7).

Fig. 7 : Emplacement de l'entrée de l'ouvrage de montaison en fonction de l'orientation du barrage par rapport à l'écoulement principal du cours d'eau

a) Position correcte dans l'angle le plus en amont, car l'entrée est au même niveau que l'ouvrage transversal ; b) position incorrecte dans l'angle le plus en amont, car l'entrée est trop avancée dans le bief aval ; c) emplacement incorrect, car l'entrée n'est pas située dans l'angle le plus en amont (où se forme donc un cul-de-sac) ; d) emplacement correct mais difficile d'accès pour les travaux d'entretien (d'après Larinier 2002, mod.).



Dans les grands ouvrages hydroélectriques, des **galeries collectrices** sont parfois aménagées pour récupérer en différents endroits les poissons qui se présentent devant l'obstacle. Les galeries donnent généralement accès à l'ouvrage de montaison au moyen de plusieurs *entrées*, au-dessus du canal de fuite. L'efficacité de cette solution est toutefois incertaine, du fait que les poissons qui entrent dans les galeries ont tendance à ressortir par l'*entrée* suivante, en particulier lorsque le nombre d'ouvertures est important (expériences faites sur le fleuve Columbia [États-Unis] et en France ; Larinier 2002). Par ailleurs, les *entrées* sont souvent proches de la surface de l'eau, si bien que les espèces nageant au fond du lit ne parviennent pas, ou très difficilement, à les repérer et à les atteindre. Enfin, la dotation se trouve répartie entre plusieurs *entrées*. Pour ces différentes raisons, les galeries collectrices ne sont pas recommandées à ce jour.

En principe, un **by-pass** de dévalaison (cf. point 5.1.2, p. 54) peut déboucher directement dans un ouvrage de montaison. Cela présente l'avantage d'augmenter le débit et donc le *courant d'attrait* à l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. Mais le déversement du *by-pass* à la hauteur de l'ouvrage de montaison, en créant de fortes turbulences, présente aussi le risque de désorienter les poissons en montaison et en dévalaison. Ces turbulences peuvent par ailleurs constituer un obstacle supplémentaire pour les poissons en montaison.

Dans le cas d'un tronçon avec un débit résiduel peu important (dotation injectée principalement via l'ouvrage de montaison et de dévalaison), l'orifice du *by-pass* de dévalaison peut avoir pour effet de détourner les poissons en montaison s'il est situé sur la berge opposée ou à l'amont de l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. Il doit donc être installé le plus à l'aval possible, sur la même berge que l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. On peut aussi concevoir de l'installer à proximité immédiate, sur un plan parallèle.

4.1.3 Courant d'attrait et dotation

Le ***courant d'attrait*** est le courant produit à l'*Entrée* de l'ouvrage de montaison par son débit de dotation. Il est en concurrence avec d'autres courants (principaux) tels que le courant en sortie de turbine et le courant produit par le déversement du barrage. Le *courant d'attrait* a pour but d'attirer les poissons en montaison vers un possible cou-

loir de migration ou vers l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. Il peut donc servir de guide dans la zone proche de l'*entrée*, sachant toutefois que la réparabilité de l'ouvrage de montaison dépend avant tout de la position correcte de son *entrée*.

Il est essentiel que le *courant d'attrait* et l'*entrée* de l'ouvrage de montaison se trouvent à l'intérieur de la zone de recherche des migrateurs. Le *courant d'attrait* doit être perceptible sur toute la profondeur d'eau entre l'*entrée* de l'ouvrage de montaison et le fond du lit ; il doit être le moins turbulent et le plus uniforme possible. La portée potentielle et la résistance du *courant d'attrait* sont déterminées par sa **puissance**. La puissance du courant est le produit du débit, de la profondeur d'eau et de la vitesse du courant. En fonction du sens et des conditions d'écoulement dans le *bief aval*, elle détermine jusqu'à quelle distance de l'*entrée* le *courant d'attrait* traverse les *courant concurrentiels* et demeure perceptible par les poissons (Larinier 2002).

Le moyen d'optimiser le *courant d'attrait* doit être examiné en détail par un expert et éventuellement clarifié par des simulations d'écoulement. Cela suppose notamment d'analyser les possibles niveaux d'eau ainsi que les conditions d'écoulement dans le *bief aval*. En cas d'utilisation de la force hydraulique, ces conditions peuvent être influencées de façon déterminante par le sens de rotation des turbines. Il est possible d'augmenter la portée et l'uniformité du *courant d'attrait* en le faisant circuler le long d'un mur (Weichert et al. 2018). Dans le cas d'un grand ouvrage hydroélectrique, le *courant d'attrait* doit encore être perceptible à l'extrémité de la zone turbulente, ce qui signifie qu'à cet endroit sa vitesse d'écoulement doit au moins correspondre à la moitié de sa vitesse d'écoulement à l'*entrée* de l'ouvrage de montaison (Weichert et al. 2018, Heneka et al. 2019).

La **vitesse d'écoulement** à l'*entrée* doit correspondre à la vitesse d'écoulement aux points de rétrécissement de l'ouvrage de montaison (tab. 3 ; Weichert et al. 2018, 2013). Elle doit être maintenue constante, y compris en cas de variations du niveau d'eau dans le *bief aval*. Pour cela, il est possible d'utiliser des fentes d'entrée à largeur réglable (commandées en fonction du niveau d'eau) ou une *dotation supplémentaire* – ou plus généralement une combinaison des deux (cf. point 4.1.6).

L'office fédéral allemand pour l'aménagement des cours d'eau (Bundesanstalt für Wasserbau BAW) fournit des recommandations simples, pratiques et complètes pour dimensionner le *courant d'attrait* à la hauteur d'un ouvrage hydroélectrique (Heneka 2019). Ces recommandations supposent que l'entrée de l'ouvrage de montaison se trouve sur la berge où sortent les eaux turbinées et qu'elle est orientée, autant que possible, parallèlement au courant principal ; les recommandations du BAW ne sont pas directement transposables aux sites ne réunissant pas ces conditions. Pour un meilleur déploiement du *courant d'attrait*, il est possible d'échancre la berge par rapport à la ligne de rive d'origine, sur une largeur au moins trois fois égale à la largeur de la fente d'entrée de l'ouvrage de montaison (Heneka 2019). Cette échancre doit descendre plus bas que la zone de turbulences considérée pour le dimensionnement (Heneka et al. 2019) (fig. 8), de sorte que le *courant d'attrait* puisse circuler le long de la berge sans passer par la zone de turbulences.

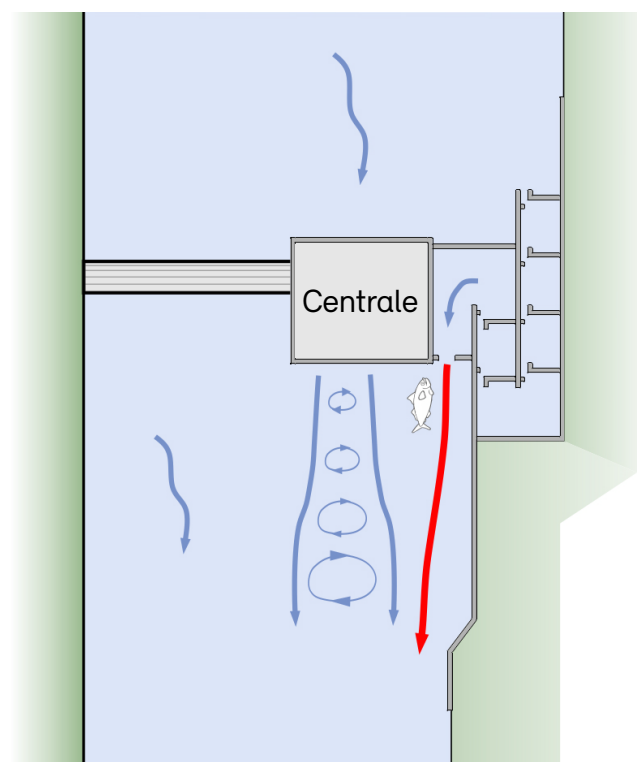
Une **dotation supplémentaire** est parfois nécessaire pour créer le *courant d'attrait* requis. Elle doit être injectée dans les bassins inférieurs de l'ouvrage de montaison, via un diffuseur séparé par une grille infranchissable (DWA 2016, p. 104 ; Redeker et Heimerl 2018). La faible vitesse d'écoulement de l'eau injectée (si possible inférieure à la *vitesse d'écoulement rhéoactive* des *espèce cibles*) doit empêcher les poissons de se tromper d'itinéraire. La *dotation supplémentaire* peut être turbinée de manière à réduire les pertes d'énergie. Il faut par ailleurs veiller à la protection et à la dévalaison des poissons au niveau de la prise d'eau à l'amont. La *dotation supplémentaire* doit fonctionner également en cas d'inactivité de la turbine de dotation.

La dotation d'un ouvrage de montaison est déterminée par deux aspects partiels. D'une part, la **dotation minimale requise** doit tenir compte du dimensionnement géométrique et hydraulique de l'ouvrage de montaison (calculé d'après les exigences spécifiques des *espèce cibles*) et du débit nécessaire à son utilisation (cf. point 4.2.2) ; il s'agit de la dotation sur toute la longueur de l'ouvrage, de l'entrée à la sortie. À l'entrée même, la dotation doit être suffisante pour produire le *courant d'attrait* requis. D'autre part, la dotation minimale peut nécessiter une *dotation supplémentaire* et un système avec des *largeur de fente* réglables.

Dans les ouvrages spécialisés, il n'existe à ce jour aucun consensus autour d'une **recommandation de dotation** générale. Mais il est communément admis que l'attrait de l'entrée d'un ouvrage de montaison est d'autant plus fort que la part du débit de dotation par rapport au débit total est élevée (Armstrong et al. 2010 ; Larinier 2002). D'après Larinier (2002), un débit de dotation est suffisant lorsqu'il correspond à 1 à 5 % du débit concurrentiel. Pour les grands cours d'eau français ayant un débit moyen de plusieurs centaines de mètres cubes par seconde (telles la Garonne et la Dordogne), Larinier (2002) estime suffisant un débit de dotation équivalant à environ 10 % du débit d'étiage et à 1 – 1,5 % du débit d'équipement (le plus souvent, deux fois

Fig. 8 : Centrale avec courant d'attrait (en rouge) à la sortie de l'ouvrage de montaison

Le courant d'attrait sort du bassin de déviation par la fente d'accès à l'ouvrage de montaison, avant d'être guidé le long de la berge échancree. Il descend jusqu'à l'extrémité de la zone de turbulences considérée pour le dimensionnement, c'est-à-dire en aval de la sortie des eaux turbinées (cercles bleus). L'entrée dans l'ouvrage de montaison se fait parallèlement au courant principal (d'après Heneka et al. 2019, mod.).



le débit annuel moyen du cours d'eau) ; le fait de recommander ici une dotation plus faible s'entend comme une mesure d'économie : une dotation plus importante obligerait à augmenter la taille de l'ouvrage de montaison, ce qui entraînerait une baisse de rendement.

En Angleterre et au Pays de Galles, le débit de dotation exigé pour un ouvrage de montaison est fixé à au moins 5 % du débit annuel moyen (Armstrong et al. 2010, p. 58 ss). Sur les sites de production hydroélectrique, la dotation doit correspondre au moins à 5 à 10 % du débit d'équipement, la valeur haute (10 %) valant pour les sites de petite taille. D'après la méta-analyse de Wolter & Schomaker (2019), la valeur médiane de la dotation d'un ouvrage de montaison fonctionnel s'élève à 5 % environ du débit annuel moyen du cours d'eau.

Toutes ces indications ne donnent aucune garantie formelle quant au débit de dotation suffisant pour un ouvrage de montaison. Elles servent seulement de point de départ pour déterminer, sur la base d'expériences antérieures, la fourchette dans laquelle doit généralement se situer la dotation d'un ouvrage de montaison.

4.1.4 Angle d'entrée

Afin que le *courant d'attrait* dans le *bief aval* soit nettement perceptible par les poissons, il faut que l'*entrée* dans l'ouvrage de montaison soit parallèle au courant principal ou qu'elle forme tout au plus un angle inférieur à 30° (Adam & Schwevers 1998 ; Pavlov 1989). Si l'**angle d'entrée** était plus grand, le *courant d'attrait* serait très vite perturbé par les *courant concurrentiels*, ce qui obligerait les poissons à suivre une trajectoire s'écartant fortement du courant principal. Une *entrée* située directement au niveau de l'obstacle suppose généralement de concevoir un ouvrage de montaison avec un parcours en colimaçon (fig. 8).

4.1.5 Liaison avec le fond du cours d'eau

L'efficacité d'un ouvrage de montaison dépend fortement de la liaison entre son *e*Entrée et le fond du cours d'eau. Si la fente d'*entrée* de l'ouvrage de montaison ne peut pas descendre jusqu'au fond du lit naturel, la continuité doit être assurée par une rampe réduisant la profondeur à l'*e*Entrée. Un tel aménagement est utile notamment lorsque la profondeur de l'eau dans le *bief aval* est importante (p. ex. fosse du barrage), en ce qu'il permet d'accélérer ponctuellement

l'écoulement du *courant d'attrait* sans augmenter la dotation. Cependant, la profondeur à l'*entrée* doit rester suffisante pour que le *courant d'attrait* ne soit pas perceptible uniquement à proximité de la surface, ce qui le rendrait difficile à trouver par les poissons nageant au fond du lit.

Cet aménagement sert en premier lieu à guider les poissons vers l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. La transition entre le fond du cours d'eau et la rampe doit pouvoir se faire par tous les côtés, à la façon d'un cône de déjection dans une embouchure. Cela évite aux poissons de fond de se retrouver bloqués dans un cul-de-sac, comme cela peut arriver avec les systèmes de liaison avec le fond du lit grâce à une berme ou une rampe cunéiforme, avec des orifices d'*entrée* situés exclusivement à proximité de la surface.

Une rampe de liaison entre l'entrée de l'ouvrage de montaison et le fond du cours d'eau doit avoir une inclinaison maximale de 1:2 (50 %) dans le sens du courant (DWA 2016). Il convient, dans l'idéal, de la concevoir aussi plate que possible. La pente latérale vers la berge peut toutefois être plus inclinée si l'endroit est extrêmement exigu ou si la profondeur est importante à l'extérieur de l'*entrée* de l'ouvrage (p. ex. à l'extrémité du canal de fuite). La rampe doit se composer d'un substrat grossier (cf. point 3.3.1).

Afin de ne pas désorienter les poissons migrateurs, il est important que la rampe ne crée pas de remous, qu'il s'agisse de tourbillons à la surface de l'eau (visibles) ou de remous de fond (peu visibles). Cela implique de prendre en considération les conditions d'écoulement dans le *bief aval*, car l'inclinaison de la rampe à elle seule n'offre aucune garantie contre la formation des remous. Naturellement, il faut aussi tenir compte des différents niveaux d'eau à l'aval, car ils peuvent influencer sur les conditions d'écoulement.

4.1.6 Variations de débit et de niveau d'eau, situation dans la zone d'entrée

La situation à l'entrée d'un ouvrage dans le *bief aval* (niveau d'eau, turbulence, vitesse et sens d'écoulement) peut fortement varier selon les conditions de débit (crues, étiages) et les phases de commande des turbines et des segments du barrage. Ces changements peuvent avoir une incidence sur la réparabilité de l'ouvrage de montaison et doivent donc être pris en compte lors de la planification (cf. point 6.1).

Comme les conditions d'écoulement infranchissables – et donc la zone de recherche des migrateurs – changent localement de position en fonction du débit, la repérabilité de l'ouvrage de montaison doit être garantie à tout moment par l'existence et l'exploitation de **plusieurs entrées**. Celles-ci peuvent être régulées par des vannes sensibles au niveau d'eau par exemple, de sorte qu'une *e*Entrée au moins reste toujours accessible aux poissons.

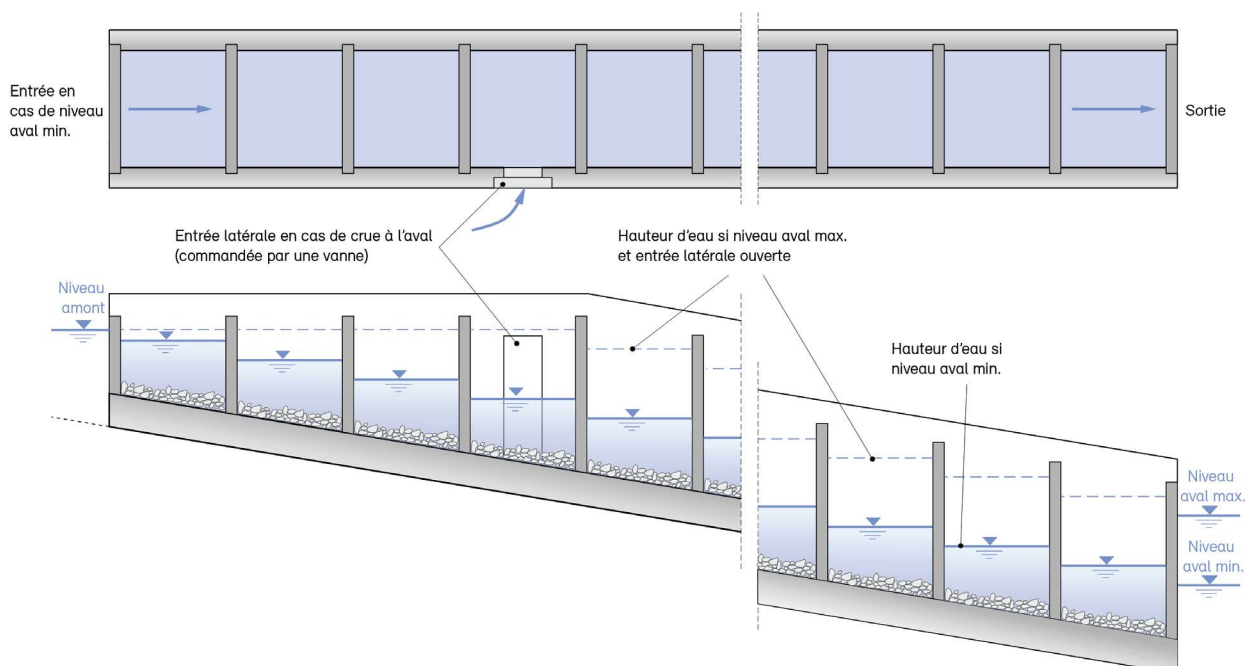
Une crue dans le *bief aval* peut avoir pour conséquence de submerger la zone d'entrée de l'ouvrage de montaison et donc de rendre le **courant d'attrait** imperceptible. Si l'ouvrage est en forme de S, il existe en outre le risque que le premier bassin inférieur non entièrement submergé, qui constitue dans ce cas l'*entrée* de l'ouvrage, se retrouve dans le sens opposé au courant principal. Pour maîtriser ce risque, il faut veiller à ce que les parois longitudinales dans la zone inférieure de l'ouvrage de montaison dépassent au moins le niveau d'eau *P30* et *P330* du *bief aval*, ce afin d'empêcher la submersion latérale de l'ouvrage de montaison. Cette contre-mesure empêche par ailleurs l'*entrée* de débris flottants.

Pour améliorer le *courant d'attrait* en cas de crue à l'aval, il existe plusieurs possibilités :

- augmenter la dotation de l'ensemble de l'ouvrage ;
- injecter une *dotation supplémentaire* dans l'un des bassins inférieurs de l'ouvrage de montaison (cf. point 4.1.3) ;
- installer à l'*entrée* un panneau à position réglable permettant d'adapter la vitesse d'écoulement du *courant d'attrait* au niveau de l'*entrée* (Redeker et Heimerl 2018) ;
- dans le cas d'une passe à fentes verticales, prévoir un moyen de court-circuiter les bassins supérieurs (fig. 9 ; DWA 2016, p. 112) afin d'augmenter la profondeur d'écoulement dans les autres bassins se succédant jusqu'au bassin inférieur. Cela permet d'accroître le débit total et donc de rétablir, au niveau de la fente d'*entrée*, la hauteur de chute initiale entre le dernier bassin et le *bief aval*. La vitesse d'écoulement moyenne au niveau de la fente d'*entrée* est ainsi augmentée.

Fig. 9 : Passe à fentes verticales avec entrée latérale

Le fait de court-circuiter les bassins supérieurs agit comme une dotation supplémentaire et augmente le niveau d'eau jusqu'au bassin inférieur. Cela permet de maintenir la hauteur de chute (vitesse d'écoulement moyenne) entre le bassin inférieur et le *bief aval* y compris en cas de crue à l'aval (d'après Krüger, cité dans DWA 2016, p. 112, mod.).



Il est important que les parois longitudinales et transversales de l'ouvrage de montaison soient suffisamment hautes pour contenir l'augmentation du niveau de dotation. Il faut en outre tenir compte des dimensions et de la conception de l'ouverture d'entrée (cf. point 4.1.7) et des valeurs limites à respecter pour garantir la franchissabilité de l'ouvrage (cf. point 4.2).

4.1.7 Conception de l'entrée

Dans l'idéal, l'entrée d'une passe à poissons est une ouverture continue traversant toute la profondeur du cours d'eau, de la surface jusqu'au fond. Si les conditions locales ne permettent pas de concevoir une telle ouverture, la fente d'entrée de l'ouvrage de montaison peut être associée à une rampe, l'essentiel étant de couvrir dans tous les cas la distance complète entre la surface et le fond du cours d'eau. L'entrée doit au moins présenter les mêmes dimensions que les fentes situées à l'intérieur de l'ouvrage de montaison. Ces dimensions doivent être déterminées en fonction des espèces cibles et de la zonation piscicole (cf. point 4.2). Si le niveau d'eau dans le bief aval est variable (cf. point 4.1.6), l'ouverture doit être conçue de manière à ce que son sommet dépasse toujours le niveau d'eau de sorte que les poissons de surface puissent y entrer sans quitter leur ligne de nage.

4.2 Franchissabilité

La franchissabilité d'un ouvrage de montaison dépend en particulier du dimensionnement géométrique et des conditions hydrauliques.

4.2.1 Dimensionnement géométrique

Un poisson migrateur qui remonte le courant a besoin de suffisamment d'espace pour ne pas entrer en contact physique avec des éléments construits. Il lui faut également une profondeur d'eau suffisante pour pouvoir se déplacer de façon optimale, c'est-à-dire sans toucher le fond et sans que sa nageoire dorsale ne sorte de l'eau. Le dimensionnement géométrique de l'ouvrage de montaison doit donc s'aligner sur les mesures corporelles des plus grandes espèces de poissons présentes localement (cf. point 3.3.3).

La géométrie de l'ouvrage de montaison influence les conditions hydrauliques (*puissance volumique dissipée*, vitesses d'écoulement, turbulence, profondeur d'écoulement, etc.). Afin que les spécifications hydrauliques puissent être respectées, il est parfois nécessaire que l'ouvrage de franchissement ait des dimensions plus grandes que celles calculées à partir des spécifications géométriques (cf. point 4.2.2).

Le dimensionnement des différents types d'ouvrage de montaison est décrit sous 4.3 ; le tableau ci-dessous concerne uniquement la profondeur d'eau. La profondeur d'eau déterminante est la distance entre l'arête supérieure des éléments de rugosité qui composent le substrat de fond (hauteur de rugosité) et le niveau de l'eau. Dans les passes à bassins, elle est importante à deux endroits : au-dessous de la cloison (profondeur d'eau dans le *couloir de migration*) et au passage entre les bassins (profondeur d'eau aux points de rétrécissement). La profondeur d'eau minimale à respecter est conditionnée par la hauteur du corps du poisson (tab. 1).

Tab. 1 : Profondeur d'eau minimale d'un ouvrage de montaison

Paramètre	Valeur limite	Description
Profondeur d'eau minimale dans le <i>couloir de migration</i> [m]	$2,5 \times H_p$	H_p = hauteur corporelle (mesurée à la base de la nageoire dorsale)
Profondeur d'eau minimale aux points de rétrécissement [m] (p. ex. dans la fente ou au niveau des gués dans un chenal de contournement)	$2 \times H_p$	

Source : DWA 2016, tab. 16, p. 123

4.2.2 Conditions hydrauliques

Afin que les poissons puissent repérer le sens de migration, il faut que la *vitesse d'écoulement rhéactive* soit atteinte ou dépassée dans le *couloir de migration* (tab. 2 ; cf. point 3.3.1). Toutefois, comme cette vitesse ne doit pas excéder la vitesse de nage des poissons les moins performants (vitesse augmentée), il est important de calculer la vitesse d'écoulement dans le *couloir de migration* en prenant pour base les poissons les moins bons nageurs de la

classe d'âge 1+. Le paramètre déterminant pour les calculs est la vitesse d'écoulement pondérée dans le temps et en fonction de la profondeur.

Tab. 2 : Vitesse d'écoulement moyenne minimale et maximale dans le couloir de migration d'un ouvrage de montaison

Paramètre	Valeur limite
Vitesse d'écoulement moyenne minimale [m/s] dans le couloir de migration	Eaux à truites lacustres ou à saumons : 0,3 Autres eaux : 0,2
Vitesse d'écoulement moyenne maximale [m/s] dans le couloir de migration	5 x longueur totale [m] de la classe d'âge 1+ de l'espèce la moins bonne nageuse

Source : DWA 2016, tab. 20, p. 128

Dans les ouvrages à bassins, la vitesse d'écoulement maximale v_{max} se déploie environ une *largeur de fente* en dessous du point de rétrécissement. À cet endroit, la vitesse d'écoulement moyenne se calcule (abstraction faite de la vitesse d'approche) à partir de la différence de niveau d'eau entre bassins (Δh) :

$$v_{max} = \sqrt{2 \times g \times \Delta h}$$

Utiliser v_{max} en tant que vitesse de dimensionnement est une approche qui a fait ses preuves dans la pratique. Les valeurs limites indiquées ci-dessous (tab. 3) garantissent la bonne franchissabilité de l'ouvrage de montaison.

Tab. 3 : Vitesse d'écoulement maximale aux points de rétrécissement d'une passe à fentes verticales ou à bassins rugueux

Paramètre	Dénivellation totale	Valeur limite par zonation piscicole				
		Zone supérieure de la truite	Zone inférieure de la truite	Zone à ombres	Zone à barbeaux	Zone à brèmes
Vitesse d'écoulement moyenne maximale [m/s] en dessous des points de rétrécissement (et différence de niveau d'eau maximale déduite Δh)	< 3 m	2,2 ($\Delta h = 0,25$)	2,1 ($\Delta h = 0,22$)	2,0 ($\Delta h = 0,20$)	1,8 ($\Delta h = 0,17$)	1,7 ($\Delta h = 0,15$)
	3 m à 6 m	2,1 ($\Delta h = 0,22$)	2,0 ($\Delta h = 0,20$)	1,9 ($\Delta h = 0,18$)	1,7 ($\Delta h = 0,15$)	1,6 ($\Delta h = 0,13$)
	6 m à 9 m	2,0 ($\Delta h = 0,20$)	1,9 ($\Delta h = 0,18$)	1,8 ($\Delta h = 0,17$)	1,6 ($\Delta h = 0,13$)	1,5 ($\Delta h = 0,11$)
	> 9 m	1,9 ($\Delta h = 0,18$)	1,8 ($\Delta h = 0,17$)	1,7 ($\Delta h = 0,15$)	1,6 ($\Delta h = 0,13$)	1,5 ($\Delta h = 0,11$)

Source : DWA 2016, tab. 17, p. 127

Tab. 4 : Valeurs limites de la puissance volumique dissipée

Paramètre	Type d'ouvrage	Valeur limite par zonation piscicole				
		Zone supérieure de la truite	Zone inférieure de la truite	Zone à ombres	Zone à barbeaux	Zone à brèmes
Puissance volumique dissipée maximale [W/m ³]	Passé à fentes verticales, passe à bassins rugueux	250	225	200	100	100
	Rampe avec pierres d'achoppement	300	275	250	200	175

Source : DWA 2016, tab. 21, p. 130

La **puissance volumique dissipée** est une mesure simplifiée de la conversion d'énergie cinétique, par turbulence et friction, en une autre forme d'énergie (p. ex. chaleur ou bruit). De manière simplifiée, une *puissance volumique dissipée* élevée est assimilable à une forte turbulence. Les fortes turbulences peuvent empêcher la migration des poissons ou pour le moins la contrarier (prise de retard, dépense accrue d'énergie, etc.) (cf. point 3.1.2).

La *puissance volumique dissipée* est une valeur moyenne donnée pour le volume total d'un bassin ; elle ne fournit aucune indication sur la répartition des turbulences à l'intérieur du bassin. Il est important de noter que la *puissance volumique dissipée* augmente proportionnellement à la hauteur de chute entre bassins (Δh). Les valeurs limites figurent dans le tableau 4.

Dans le cas d'un ouvrage à bassins (passe à fentes verticales, passe à bassins rugueux), la *puissance volumique dissipée* P_v se calcule selon la formule suivante :

$$P_v = \frac{\rho_w \times g \times Q \times \Delta h}{V}$$

où

- P_v = puissance volumique dissipée [W/m³]
- ρ_w = masse volumique de l'eau (constante) [1000 kg/m³]
- g = accélération terrestre (constante) [9,81 m/s²]
- Q = débit transitant dans l'ouvrage de montaison [m³/s]
- Δh = différence de niveau d'eau entre deux bassins successifs [m]
- V = volume d'eau du bassin [m³]

Un **fond** rugueux avec des interstices bien creusés peut faciliter la montaison des petits poissons (cf. point 3.3.1). Il peut également accentuer la variation temporelle de la vitesse d'écoulement à proximité du fond, créant ainsi de façon temporaire des couloirs avec une vitesse d'écoulement plus lente, que les poissons peuvent emprunter

pour remonter le courant⁴. À travers des fentes verticales, au contraire, la vitesse d'écoulement est globalement constante sur toute la profondeur (pour un ratio standard entre hauteur de chute et profondeur d'écoulement) du fait que le débit est dominé par la variation de pression (Rajaratnam et al. 1986) ; même un substrat rugueux au fond de l'ouvrage ne permet pas de réduire notablement la vitesse d'écoulement (Henning et Weichert 2020). Certaines publications spécialisées (p. ex. DWA 2016) considèrent toutefois que le substrat de fond est un facteur important pour la franchissabilité des points de rétrécissement, raison pour laquelle il ne doit être interrompu à aucun endroit.

Le **débit d'exploitation** d'un ouvrage de montaison dépend du type de construction et du dimensionnement géométrique et correspond à la quantité d'eau requise pour respecter les spécifications hydrauliques. Afin d'améliorer la réparabilité de l'ouvrage, une *dotation supplémentaire* peut être nécessaire dans la zone d'entrée (cf. point 4.1.3).

4.2.3 Lumière

Dans l'idéal, la **lumière** dans l'ouvrage de montaison doit être naturelle. Il faut éviter l'obscurité complète et les changements brusques de luminosité, car certaines espèces de poissons migrent seulement en présence de lumière (Armstrong et al. 2010, p. 199 ; Fischer et Schmalz 2016). Dans certains cas, la construction de puits de lumière ou un éclairage artificiel en journée peut s'avérer nécessaire.

4.2.4 Sortie

Dans la zone où se situe la *sortie* de l'ouvrage de montaison, il ne doit y avoir ni vitesses d'écoulement élevées ni fortes turbulences. La *sortie* doit être suffisamment **éloignée de la grille ou du barrage** pour que les poissons fatigués ou désorientés ne soient pas entraînés par le courant (tab. 5). Elle peut éventuellement être placée plus à l'amont, au niveau de la queue de retenue, afin que les poissons évitent la zone de retenue. La présence d'une **berge structurée** dans la zone de *sortie* peut par ailleurs protéger les poissons tant de la dérive que de la prédation.

⁴ La moyenne temporelle de la vitesse ne donne aucune indication sur la fourchette des vitesses effectives dans l'ouvrage, puisque celle-ci connaît des variations stochastiques au niveau de la fente en raison des turbulences dans les bassins. Cette variation temporelle crée temporairement des couloirs dans lesquels la vitesse est inférieure ou supérieure à la vitesse moyenne et que les poissons peuvent donc utiliser pour leur montaison.

Tab. 5 : Distance minimale entre la sortie de l'ouvrage de montaison et la grille ou le barrage

Paramètre	Valeur limite [m]
Distance minimale pour une vitesse d'approche $\leq 0,5$ m/s	≥ 5
Distance minimale pour une vitesse d'approche $> 0,5$ m/s	≥ 10

Source : DWA 2016

Dans toute la mesure du possible, un ouvrage de montaison doit être protégé contre l'introduction de **détritus flottants et de matériaux charriés**. La sortie de l'ouvrage doit être positionnée en conséquence (p. ex. contre le sens d'écoulement principal de l'eau) et équipée d'un système de protection (p. ex. barrière flottante, paroi plongeante, épi) qui n'entrave pas la migration des poissons.

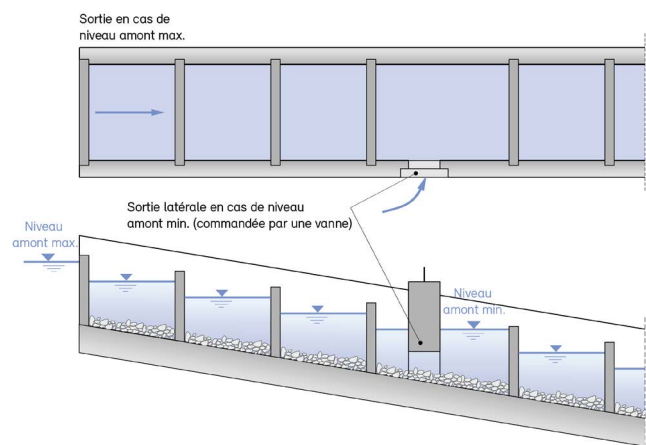
Dans la zone de sortie, la **liaison** entre le fond de l'ouvrage et le fond du *bief amont* doit être assurée sans discontinuité. Les exigences sont en principe les mêmes que dans la zone d'entrée (cf. point 4.1.5). Si une rampe de fond est nécessaire, elle doit se trouver dans le *bief amont*, c'est-à-dire à l'extérieur de l'ouvrage à proprement parler, de sorte que les poissons puissent nager jusqu'à la sortie à une vitesse au moins égale à la *vitesse d'écoulement rhéactive*. Si la rampe se trouvait dans le bassin supérieur de l'ouvrage de montaison, leur nage à cette vitesse serait interrompue par les changements de conditions hydrauliques survenant dans le bassin supérieur. La sortie devrait alors couvrir toute la colonne d'eau afin de servir aussi bien aux poissons de fond qu'aux poissons de surface, ce qui augmenterait le risque d'introduction de débris flottants et de matériaux charriés.

4.2.5 Variations de débit et de niveau d'eau, situation dans la zone de sortie

La conception de la sortie est exigeante, car elle correspond également à la prise d'eau de l'ouvrage de montaison et doit garantir de bonnes conditions hydrauliques pour tous les **débits et niveaux d'eau** pertinents (Zauner et al. 2005). En cas de fortes variations du niveau d'eau à l'amont, il faut opter pour une construction dont le fonctionnement ne sera pas gêné par de telles fluctuations ; si des adaptations sont quand même nécessaires à la sor-

Fig. 10 : Ouvrage de montaison

Ouvrage de montaison avec une sortie latérale pouvant être fermée par une vanne en fonction du niveau d'eau du bief amont et garantissant la sortie des poissons malgré les variations de niveau d'eau (d'après Krüger, cité dans DWA 2016, p. 134).



tie de l'ouvrage, des mesures constructives complémentaires sont à prévoir (DWA 2016, p. 134), par exemple la construction de plusieurs sorties correspondant à différents niveaux d'eau (fig. 10). Comme l'ouvrage de montaison ne doit jamais être à sec, une dotation d'urgence est également indiquée dans certains cas (p. ex. curage du bassin d'accumulation causant une importante fluctuation du niveau d'eau).

4.3 Réalisation technique

Selon DWA 2016, il existe deux catégories d'ouvrages de montaison : les ouvrages à chenal et à bassins et les constructions spéciales (p. ex. ascenseur à poissons, écluse à poissons, écluse à poissons avec ascenseur, système à pompes). Contrairement aux ouvrages à bassins, les constructions spéciales ont un fonctionnement discontinu, ce qui signifie que les poissons souhaitant franchir l'obstacle doivent interrompre leur migration et patienter dans une zone d'entrée élargie (p. ex. dans le bassin mobile d'un ascenseur ou dans le sas d'une écluse) jusqu'à ce qu'ils soient transférés à l'amont par l'ouvrage et qu'ils puissent poursuivre leur migration dans le *bief amont*. Les constructions spéciales se caractérisent également par le fait que l'accès à la zone d'attente est impossible pendant

certaines phases d'exploitation (p. ex. phases de remplissage et de vidange de l'écluse et phase de sortie des poissons). Ces temps d'attente augmentent le risque que les poissons interrompent leur migration et retournent dans le *bief aval*. Pour cette raison, les ouvrages à fonctionnement continu doivent en principe être préférés aux constructions spéciales. Ces dernières constituent toutefois une solution intéressante quand la zone est très étroite, quand les hauteurs de chute sont très importantes ou quand les niveaux d'eau à l'amont sont très variables.

En fonction des particularités locales, il est parfois nécessaire de combiner plusieurs types d'ouvrages de montaison. Comme les zones de transition entre deux types d'ouvrages peuvent potentiellement constituer des points faibles, elles doivent être soigneusement étudiées et il est essentiel que l'ensemble des spécifications géométriques et hydrauliques soient respectées au niveau de ces transitions également.

4.3.1 Passe à fentes verticales

Une passe à fentes verticales est une succession de bassins dont les cloisons sont équipées d'une ou (plus rarement) de deux fentes verticales. Les fentes vont du fond du bassin jusqu'au-dessus du niveau de l'eau. En plus de l'ouvrage classique largement répandu (de type « vertical slot pass »), il existe quelques conceptions innovantes comme la passe en éléments préfabriqués et la passe à méandres qui, pour l'essentiel, se distinguent de l'ouvrage classique par la géométrie et les conditions hydrauliques des bassins.

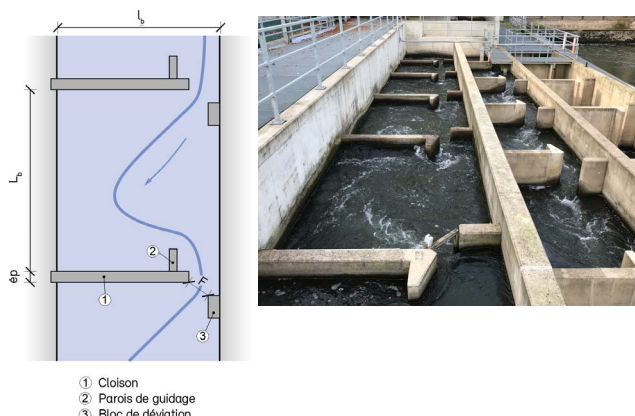
4.3.1.1 Passe de conception classique

Dans sa version classique, la passe à fentes verticales est un chenal rectangulaire à l'intérieur duquel sont érigés des cloisons et des blocs de déviation (fig. 11). En fonction de la géométrie des bassins, le modèle d'écoulement dans la passe peut être un modèle de stabilisation, un modèle de dissipation, une alternance ou un mélange des deux (fig. 12).

En conditions de laboratoire et avec une trajectoire rectiligne jusqu'au bassin le plus en amont, le constat suivant s'applique. Pour une longueur libre de bassin L_b équivalant au moins à 10 fois la *largeur de fente* F et pour une pente de 5 à 10 % (typique des passes classiques), la transition entre stabilisation et dissipation, pour une forme de fente

Fig. 11 : Passe à fentes verticales de conception classique

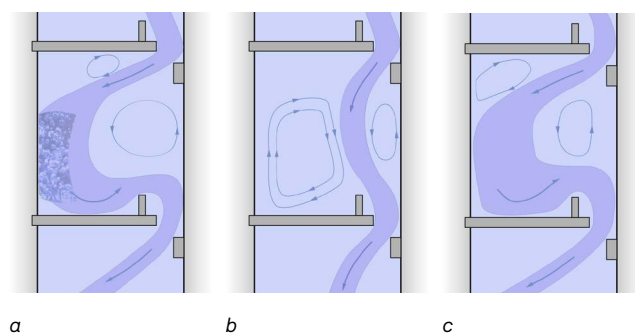
À gauche, vue en plan (d'après DWA 2016, mod.) ; à droite, exemple du barrage de la Moselle à Coblençe, en Allemagne, pour lequel on observe un modèle de dissipation dans la partie gauche et un modèle de stabilisation dans la partie droite (photo M. Mende).



- ① Cloison
- ② Parois de guidage
- ③ Bloc de déviation

Fig. 12 : Représentation de l'écoulement

Représentation de l'écoulement dans les bassins d'une passe à fentes verticales (a) avec effet de stabilisation, (b) avec effet de dissipation ou (c) avec les deux (d'après Gebler 2015, mod.).



selon DWA (2016), est située dans une fourchette l_b/L_b comprise entre 0,70 et 0,73 (l_b désignant la largeur du bassin). Dans cette fourchette, le modèle d'écoulement est mixte (Wang et al. 2010). Si le ratio l_b/L_b est supérieur à cette fourchette, la passe a pour effet de stabiliser le courant ; s'il est inférieur, il faut s'attendre à une dissipation du courant (Bermudez et al. 2010).

Or, contrairement aux conditions de laboratoire susmentionnées, la trajectoire à l'intérieur d'une passe à fentes verticales, ou d'une partie de celle-ci, n'est souvent pas

rectiligne. Ainsi, même avec une géométrie uniforme des bassins, l'écoulement en aval d'un bassin permettant un changement de direction peut être différent de celui en amont (fig. 11, à droite). L'indication de valeurs précises pour le ratio l_b/L_b n'est donc pas pertinente dans la pratique. DWA (2016) recommande un dimensionnement avec $l_b/L_b \approx 0,75$ (tab. 6), pour lequel les modèles d'écoulement sont principalement des modèles mixtes.

La dissipation de courant due à la forte projection du jet contre la paroi latérale provoque la formation d'une turbulence non stationnaire sur des axes verticaux et horizontaux. Si l'on ignore encore dans quelle mesure cette turbulence désoriente les poissons, les études de Pitsch et Mockenhaupt (2015) montrent toutefois que la vitesse de passage peut être notablement diminuée dans les ouvrages à dissipation, comparativement aux ouvrages avec stabilisation du courant ou avec alternance des deux modèles. Il y a donc lieu de privilégier les passes avec un effet stabilisateur et une ligne de courant sinueuse (pas de *courant de court-circuit*) ou bien les ouvrages mixtes.

Pour les passes à fentes verticales de conception classique, les longueurs libres de bassin L_b équivalant au moins à 3 fois la longueur de poisson L_p et les largeurs de fente F équivalant au moins à 3 fois la largeur de poisson l_p ont fait leurs preuves aujourd'hui. Elles permettent de déterminer les valeurs de dimensionnement géométriques (tab. 6) en fonction des grandeurs de référence des espèces de poissons concernées (cf. point 3.3.3). Le respect de ces spécifications et des valeurs limites de la vitesse d'écoulement maximale (tab. 3) garantit également le respect de la *puissance volumique dissipée* maximale (tab. 4). À titre exceptionnel, si le lieu est extrêmement exigu, les valeurs limites de dimensionnement géométrique peuvent être très légèrement inférieures à celles prescrites (cf. point 1.3) ; dans ce cas, il faut absolument s'assurer que les valeurs limites de la *puissance volumique dissipée* ne sont pas dépassées.

Il faut renoncer à installer des bassins supplémentaires avec une *puissance volumique dissipée* particulièrement faible (« bassins de repos »), car ils favorisent les dépôts de sédiments et l'établissement de prédateurs. Pour la même raison, les bassins de changement de direction

doivent être aussi peu nombreux que possible et être aménagés d'après DWA (2016, p. 223 à 225).

Tab. 6 : Valeurs limites garantissant la franchissabilité d'une passe à fentes verticales de conception classique

Paramètre	Valeur limite
Longueur libre du bassin (espacement longitudinal des éléments) [m]	Minimum : $L_b = 3 \times L_p$ (L_p = longueur totale du poisson, mesurée du bout du museau à l'extrémité de la nageoire caudale)
Largeur libre du bassin [m]	$l_b = L_b \times 3/4$ (L_b = longueur libre du bassin)
Largeur libre minimale de la fente [m]	$F_{\min} = 3 \times l_p$ (l_p = largeur maximale du corps du poisson)

Source : DWA 2016, tab. 16, p. 123

La dimension des éléments qui composent la passe (parois de guidage en forme de crochet, taille et position des blocs de déviation, etc.) doit elle aussi se conformer aux indications fournies dans DWA (2016, p. 240 s.).

Le fond d'une passe à fentes verticales de conception classique est formé d'une couche de substrat stable avec un bon système interstitiel. Pour garantir la stabilité du fond, il est recommandé de combiner un matériau support (blocs de pierre de 30 à 45 cm) avec un matériau de remplissage (graviers de 5 à 15 cm). Dans certaines circonstances, il peut être utile de déposer et éventuellement de couler dans le béton des pierres de plus grande taille, qui empêcheront le substrat de se détacher du fond ; il faut alors étudier les effets de cet assemblage sur les conditions hydrauliques. Des indications détaillées sont disponibles dans DWA (2016, p. 132 s.).

Appréciation : la passe à fentes verticales de conception classique est un ouvrage technique de montagne largement répandu, pour lequel nous disposons d'une expérience de plusieurs décennies. Son efficacité est prouvée par de nombreux suivis réalisés dans tous les types de cours d'eau.

4.3.1.2 Passe en éléments préfabriqués

La passe à fentes verticales en éléments préfabriqués, baptisée enature® FISHPASS par son fabricant, a été développée en Autriche. La première installation pilote a été mise en service en 2009. La passe est conçue comme un assem-

blage d'éléments préfabriqués en béton, formant un chenal rectangulaire composé de grands bassins principaux (dans lesquels s'opère la *dissipation énergétique*) et d'une alternance gauche-droite de petits bassins intermédiaires (sections à fente verticale).

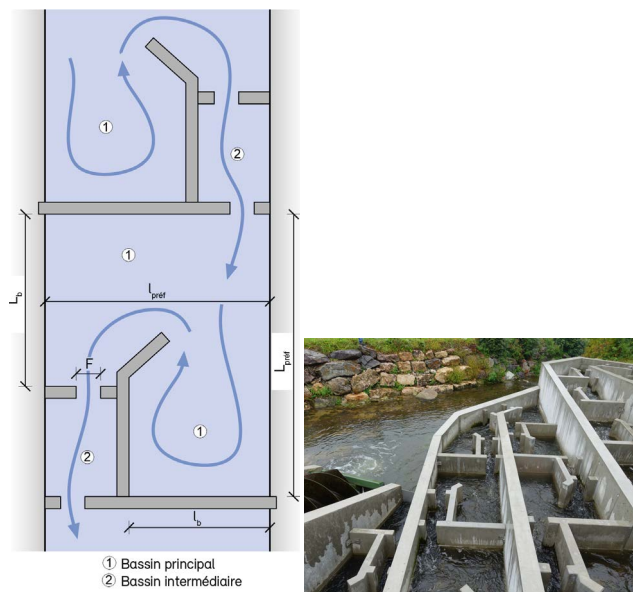
Dans les sections à fente verticale, un courant de rugosité isolé se crée entre les deux points de rétrécissement. Cela provoque des pertes hydrauliques (pertes par friction et par changement de forme) qui ont pour effet de réduire la vitesse d'écoulement et donc le débit d'eau. Par rapport à une passe de conception classique et pour les mêmes valeurs de dimension de bassin, de *largeur de fente* et de hauteur de chute entre bassins, le débit est réduit de 40 %, la vitesse d'écoulement de 20 % et la *puissance volumique dissipée* de 30 % (Mader et Tauber 2010). Le fait que la vitesse d'écoulement et la *puissance volumique dissipée* soient réduites devrait permettre en théorie d'opter pour une hauteur de chute entre bassins plus importante, mais ce point reste à clarifier. Mieux vaut donc utiliser pour l'heure les mêmes valeurs limites que pour les passes classiques (tab. 3), y compris s'agissant de la *largeur de fente* (tab. 6).

Le bassin principal avec son bassin intermédiaire ($l_{\text{préf}} \times L_{\text{préf}}$, fig. 13) est aussi grand que le bassin d'une passe classique (tab. 6), ce qui signifie que l'encombrement des deux ouvrages est à peu près identique pour une même hauteur de chute entre bassins. Cependant, les valeurs limites géométriques de l'ouvrage classique (tab. 6) ne sont pas respectées puisque l'espacement longitudinal de la fente, qui définit la longueur de bassin L_b , est plus petit. Cela vaut également pour la largeur de bassin l_b . Comme la *puissance volumique dissipée* dans les bassins est réduite de 30 %, on peut supposer que malgré le non-respect des valeurs limites géométriques, la franchissabilité est garantie également pour les grands poissons. Pour sa part, le fond de la passe est conçu comme dans un ouvrage classique.

Appréciation : l'efficacité de la passe à fentes verticales en éléments préfabriqués a été étudiée dans toutes les *zonation piscicoles* d'Autriche (de la zone à barbeaux à la zone supérieure de la truite) dans le cadre de plusieurs contrôles de suivi (p. ex. Ellinger et al. 2016, Wolfram 2015). De manière générale, les installations contrôlées ont été jugées efficaces. En raison du petit nombre d'études disponibles, un jugement définitif est toutefois impossible à ce jour. La passe en élé-

Fig. 13 : Passe à fentes verticales en éléments préfabriqués

À gauche, vue en plan avec des flèches indiquant le sens d'écoulement (d'après www.maba-fischpass.com, mod.) ; à droite, photo d'un tel ouvrage à la centrale de Lengnau sur la Surb (photo : A. Peter).



ments préfabriqués peut constituer une alternative à la passe à bassins classique, par exemple dans les situations où cette dernière n'est pas supportable économiquement en raison de son important besoin d'eau.

4.3.1.3 Passe à méandres

La passe à méandres est commercialisée depuis le milieu des années 1990 sous le nom Mäanderfischpass®. Depuis sa mise sur le marché, elle a été perfectionnée sur la base des expériences faites. Il existe aujourd'hui 66 installations (64 en Allemagne et deux dans le canton du Jura), dont 42 sont de type C, 15 de type J et 5 de type H (fig. 14). Quatre autres installations sont des constructions spéciales mixtes ou en forme de tour (Helbig et al. 2016).

La passe à méandres est une succession de bassins circulaires à fente verticale qui sont disposés à l'intérieur d'un chenal rectangulaire. Les possibilités de combinaison offertes par les trois variantes permettent d'adapter le tracé et la déclivité longitudinale en fonction des conditions locales (fig. 15). De manière générale, le fait que l'ouvrage soit compact et que son tracé soit variable permet de réduire considérablement l'encombrement et les coûts de construction par rapport à un ouvrage classique (tab. 7).

Fig. 14 : Différentes variantes de passe à méandres

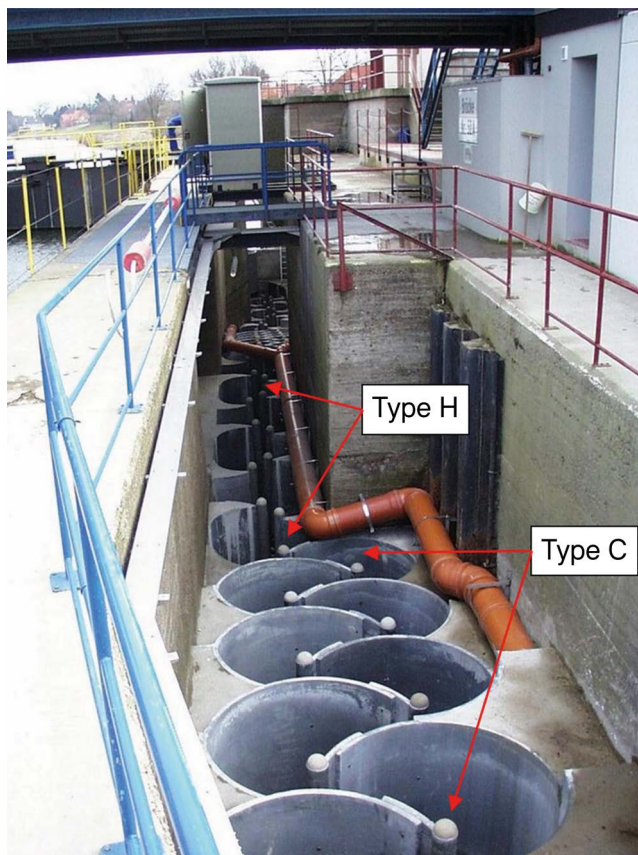
À gauche, type C ; au centre, type J ; à droite, type H.



Illustrations et photos : Peters Ökofisch GmbH & Co. KG, dans Mende et al. 2019

Fig. 15 : Passe à méandres

Passe à méandres de types C et H au niveau de l'ouvrage hydroélectrique de Drakenburg en Basse-Saxe (Allemagne) peu avant sa mise en service.



Source : Peters Ökofisch GmbH & Co. KG, dans Mende et al. 2019, mod.

Tab. 7 : Valeurs limites garantissant la franchissabilité d'une passe à méandres

Paramètre	Variante	Valeur limite
Longueur libre du bassin (espacement longitudinal des éléments) [m]	Type J / Type H	Minimum : $L_b = 3 \times L_p$ (L_p = longueur totale du poisson, mesurée du bout du museau à l'extrémité de la nageoire caudale)
Diamètre libre du bassin [m]	Type C	$D_b = 3 \times L_p$
Largeur libre du bassin [m]	Type J / Type H	$l_b = 1,0 - 2,5$
Largeur libre minimale de la fente [m]	Toutes	$F_{min} = 3 \times l_p$ (au-dessus du rétrécissement)

Source : données du fabricant, Peters 2005 ; dans Mende et al. 2019

Dans une passe à méandres, les fentes verticales se rétrécissent en direction du fond, si bien que le débit est souvent plus petit que dans une passe de conception classique. À l'extrémité ouverte des cloisons, la présence de manchons verticaux à position réglable permet d'ajuster la *largeur de fente* F . Dans les ouvrages construits jusqu'à présent, la *largeur de fente* moyenne est souvent inférieure à $3 \times l_p$, car on a supposé que les poissons nagent plus près des fentes arrondies d'une passe à méandres que des fentes anguleuses d'une passe classique (Mende et al. 2019). Tant que cette supposition ne sera pas confirmée par un suivi des effets dûment fondé, il conviendra de choisir une structure de fente telle que $F = 3 \times l_p$.

Le modèle d'écoulement dans une passe à méandres dépend de la variante choisie. Les trois variantes actuelles ont toutefois en commun que l'écoulement longe les parois extérieures des bassins en formant des méandres et en stabilisant le courant (fig. 16). Cet écoulement en bordure provoque, au centre des bassins, une zone stabilisatrice avec une vitesse d'écoulement lente et de faibles turbulences. Comme dans toutes les passes à fentes verticales, les vitesses maximales surviennent juste après le passage d'une fente.

La dimension des bassins prend également en considération la taille de la plus grande espèce de poissons pertinente localement. Ainsi, le diamètre d'un bassin à

méandres D_b de type C doit au moins correspondre à la longueur libre d'un bassin classique (espacement longitudinal des éléments), autrement dit $L_b = D_b = 3 \times L_p$ (tab. 7)⁵.

Le fond d'une passe à méandres est formé d'une couche de graviers ronds d'une épaisseur d'environ 80 mm (en général, la taille de grain est de 16 – 32 mm), sur laquelle une natte en polyéthylène composée de brins entrelacés (géogrille) est déposée et fixée à l'aide de demi-coques en plastique (tube en plastique de 14 cm de diamètre et de 25 cm de longueur, coupé en trois sur la longueur). Cet assemblage garantit le maintien d'un fond de roches meubles malgré une déclivité de rampe parfois importante (en particulier dans les passes de type C). Les demi-coques ne servent pas seulement à fixer la natte ; elles créent des zones de courant plus calmes près du fond et offrent des abris aux poissons de fond. À proximité des fentes verticales, elles sont disposées de telle sorte que les poissons de fond puissent se cacher derrière pour progresser sans devoir affronter le courant principal (Mende et al. 2019). D'après le fabricant, la natte sert aussi à la montaison des civelles et des anguillettes. En plus du substrat artificiel, des sédiments peu épais se déposent souvent dans la zone plus calme au centre du bassin, où ils sont colonisés par de petites plantes aquatiques.

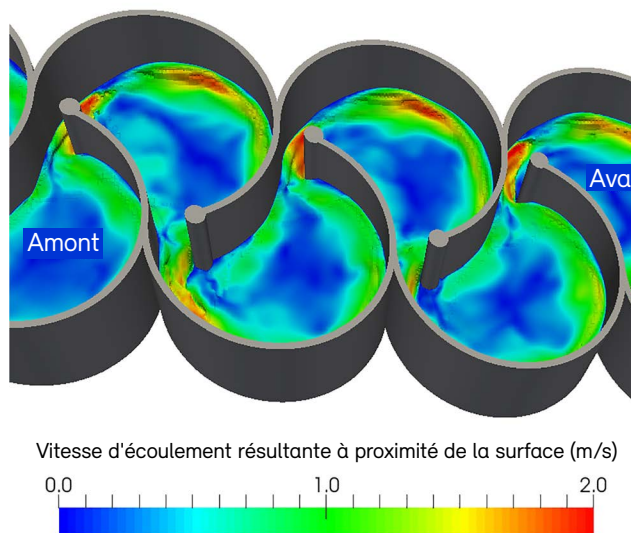
Les passes à méandres construites jusqu'à présent ont souvent des hauteurs de chute entre bassins plus importantes que celles recommandées dans DWA (2016) (p. ex. $\Delta h = 20$ cm dans la zone à barbeaux). Pour autant, aucune sélectivité sur les petits poissons n'a été constatée lors des suivis des effets. Tant qu'il ne sera pas établi clairement s'il convient de choisir pour les passes à méandres une hauteur de chute entre bassins supérieure à celle des passes classiques, mieux vaut utiliser en principe les mêmes valeurs limites que celles des passes classiques (tab. 3).

Appréciation : bien qu'un grand nombre de passes à méandres soient déjà en service, aucun suivi des effets

⁵ Il n'a pas encore été établi clairement si le diamètre d'un bassin de type C peut être inférieur à trois fois la longueur maximale des poissons. Compte tenu de la stabilisation du courant, de la faible turbulence au centre des bassins et d'un parcours rallongé (écoulement en bordure), il est possible que les poissons aient besoin de moins d'espace dans une passe à méandres que dans une passe classique (flux plus turbulent avec des courants transversaux) puisqu'ils peuvent y faire des mouvements de compensation moins amples.

Fig. 16 : Tronçon d'une passe à méandres

Tronçon d'une passe à méandres de type C (simulation 3D-HN avec OpenFOAM®, méthode LES).



Source : Université technique de Dresde/IWD, dans Mende et al. 2019)

n'a encore été réalisé dans le respect des règles méthodologiques actuelles (Mende et al. 2019). Les contrôles réalisés montrent cependant que cet ouvrage de montaison peut être franchi par toutes les espèces de poissons et qu'il n'existe probablement aucune sélectivité de taille. Cependant, l'efficacité de l'ouvrage n'a pas encore été confirmée de manière définitive. En principe, une passe à méandres peut être envisagée si une passe classique est inconcevable faute de place ou en raison de son important besoin d'eau.

4.3.2 Passe à bassins rugueux

Une passe à bassins rugueux est un ouvrage de franchissement qui combine un chenal rugueux et une passe à bassins successifs. Les cloisons et donc les passages entre bassins sont formés par des traverses de blocs de pierre en position debout (Seifert 2016). Les pierres placées dans le courant doivent être disposées de manière à éviter la formation de *courant de court-circuit* (fig. 17). Le dimensionnement d'une passe à bassins rugueux suit en principe les mêmes règles que celui d'une passe à fentes verticales de conception classique. En raison des incertitudes constructives liées à l'utilisation de blocs de pierre fragmentés, il faut toutefois appliquer aux valeurs limites des coefficients de sécurité plus élevés (tab. 1 ; tab. 3 ;

Fig. 17 : Passe à bassins rugueux

Au niveau de la centrale d'Hagneck sur l'Aar (canton de Berne).



Source : M. Mende

tab. 4). Les exigences relatives à la conception de l'entrée sont les mêmes que pour les autres types d'ouvrages. Dans la plupart des cas, positionner l'entrée à proximité de l'obstacle à la migration n'est pas plus problématique qu'avec une passe à fentes verticales. Ce qui peut poser problème en revanche, ce sont les fortes variations de niveau d'eau à l'aval, car il n'est pas possible de rehausser des cloisons en blocs de pierre comme on le fait avec les cloisons d'une passe technique. Lorsque le niveau d'eau à l'aval est trop haut, les cloisons sont submergées et le courant d'attrait s'en trouve fortement perturbé.

Le fond d'une passe à bassins rugueux suit les mêmes règles de conception que celui d'une passe classique à fentes verticales. Une étanchéité est toutefois à prévoir si la passe n'est pas intégrée dans un coffrage en béton.

Appréciation : l'apparence d'une passe à bassins rugueux est plus naturelle que celle d'une passe technique à fentes verticales. La réalisation d'un tel ouvrage est cependant plus complexe et nécessite généralement des optimisations ultérieures – qui sont toutefois nettement plus faciles à réaliser que dans un ouvrage technique. Comme le prédimensionnement des conditions hydrauliques est impossible, des essais de fonctionnement sont nécessaires. L'efficacité ichtyo-écologique d'une passe à bassins rugueux est considérée identique à celle d'une passe classique à fentes verticales, mais le risque d'erreur (p. ex. dans le réglage des hauteurs de chute irrégulières) est

plus grand qu'avec une passe en éléments préfabriqués. En raison des coefficients de sécurité plus élevés et de l'épaisseur des cloisons (traverses en blocs de pierre), l'encombrement est plus important que celui d'une passe technique à fentes verticales.

4.3.3 Rampe intégrale et rampe partielle

Une rampe est une construction en fond de lit qui s'étend sur toute la largeur d'un cours d'eau et dont la forme et la dotation permettent aussi bien la montaison que la dévalaison des poissons (fig. 18, à gauche). Elle a également pour fonction de protéger le lit du cours d'eau. Une rampe partielle est une structure directement intégrée dans le corps d'un barrage (fig. 18, à droite). En général, elle a pour seule fonction de garantir la migration piscicole. Contrairement à une passe à poissons séparée, une rampe intégrale ou partielle est traversée par des débits changeants – y compris des débits de crue – et doit donc être suffisamment robuste.

Dans le cas d'un ouvrage hydroélectrique, la construction d'une rampe est concevable uniquement pour aider à rétablir la migration piscicole au niveau du barrage et des seuils. Remplacer intégralement le barrage par une rampe est très rarement possible, car le but visé, à savoir créer une retenue d'eau, requiert presque toujours des mécanismes de commande mobiles (clapets d'évacuation, vannes, segments de traction et de pression, etc.). En règle générale, seule une rampe partielle peut être construite au niveau d'un barrage hydroélectrique, en complément des éléments mobiles du barrage.

Fig. 18 : Rampes

À gauche, rampe intégrale sur l'Emme à Biberist (canton de Soleure) avec, au centre, un lit d'étiage à bassins successifs et, sur les côtés, des structures régulières jonchées de grandes pierres individuelles pour le débit résiduel. À droite, rampe partielle sur la Sarneraa (canton d'Obwald).



Sources : M. Mende (gauche) ; IUB Engineering AG (droite)

Pour être facilement repérable par les poissons, une rampe partielle doit remplir les mêmes conditions que les autres ouvrages de montaison, ce qui signifie que son *entrée* doit généralement se situer au pied du barrage (cf. point 4.1).

Il existe typiquement deux façons de construire une rampe avec des blocs de pierre (fig. 19).

1. **Rampe compacte** : ce type de rampe se compose soit de blocs de pierre déversés en vrac, soit de blocs de pierre disposés régulièrement. La rugosité uniforme de la rampe produit un modèle d'écoulement monotone, sans zones de repos de grande taille ni zones profondes.
2. **Rampe non compacte**, structurée ou non structurée :
 - a. une **rampe structurée** est une succession de bassins profonds (fig. 20, à gauche). Pour former les bassins, il faut créer un exhaussement du cours d'eau en aménageant des traverses en blocs de pierre dans un lit relativement profond. Les traverses sont progressivement submergées à mesure que le débit augmente. Une rampe structurée s'apparente à une passe à bassins rugueux (cf. point 4.3.2), à la différence que les traverses d'une passe à bassins rugueux ne sont submergées qu'en cas de débit élevé ($> Q_{30}$) ;
 - b. dans le cas d'une **rampe non structurée**, une structure régulière est complétée par de grosses pierres individuelles qui émergent largement du cours d'eau (fig. 20, à droite). Ces « pierres d'achoppement » produisent une petite accumulation d'eau, avec des zones de ralentissement du courant et des zones d'accélération. Elles sont submergées uniquement en cas de débit élevé.

Une rampe combine fréquemment plusieurs types de structure. Le chenal d'étiage a souvent une structure en bassins, tandis que les zones latérales ont une structure régulière jonchée de pierres d'achoppement (fig. 18, à gauche). Une rampe dont la structure serait régulière de toutes parts ne garantirait pas le rétablissement de la migration piscicole en raison d'un modèle d'écoulement monotone et de l'absence de zones de repos (fig. 18, à droite).

Le dimensionnement de la rampe est déterminé par le débit d'étiage, pour lequel il faut prévoir un couloir compact (lit d'étiage). S'agissant des spécifications géométriques et

hydrauliques, les valeurs limites à respecter sont en principe les mêmes que pour une passe à bassins rugueux. À elle seule, la pente de la rampe ne donne aucune indication sur la franchissabilité de l'ouvrage. Pour les rampes à bassins avec une charge spécifique petite à moyenne (jusqu'à environ $q = 10 \text{ m}^3/[\text{s} \times \text{m}]$), il est recommandé de ne pas consolider le lit entre les traverses. Mieux vaut laisser différentes structures se former librement au fond des bassins, afin que la rampe devienne un habitat de qualité. Des informations détaillées sur la planification et la construction des rampes partielles sont disponibles dans Gebler (2009, p. 114 ss).

En règle générale, les rampes intégrales et les rampes partielles nécessitent moins d'entretien que les ouvrages techniques, car les débris flottants qu'elles retiennent sont souvent emportés par le courant lorsque les eaux montent et submergent les traverses. Après une crue importante, les rampes à bassins avec des fentes qui s'étendent au-delà de la colonne d'eau totale (comme dans une passe à bassins rugueux) peuvent avoir besoin d'un nettoyage, car des fentes éventuellement obstruées peuvent réduire la franchissabilité de l'ouvrage. Parmi les différents types de rampes à bassins, la rampe à courant sinueux demande relativement peu d'entretien (fig. 20, à gauche). Elle est composée d'une succession de traverses submergées, dont l'une est inclinée dans un sens et la suivante dans l'autre sens, si bien qu'elles retiennent très peu de matériaux flottants (Mende & Gassmann 2009, Sindelar 2011). Au point bas de chaque traverse, il convient de respecter une profondeur d'eau minimale de $2 \times H_p$ (tab. 1, profondeur d'eau minimale aux points de rétrécissement ; DWA 2016, p. 123, tab. 16).

Appréciation : dans les cours d'eau alpins et préalpins charriant beaucoup de matériaux et de bois flottant, la rampe partielle est souvent le seul ouvrage réalisable à la hauteur d'une installation hydroélectrique. Si elle respecte les valeurs limites fixées pour les paramètres géométriques et hydrauliques, on peut considérer qu'elle garantit efficacement la montaison des poissons (p. ex. ezb 2013). Avec une dotation importante par rapport au débit du barrage, elle peut également servir d'ouvrage de dévalaison.

Fig. 19 : Variantes de rampes en blocs de pierre

D'après Lange 2007, mod.

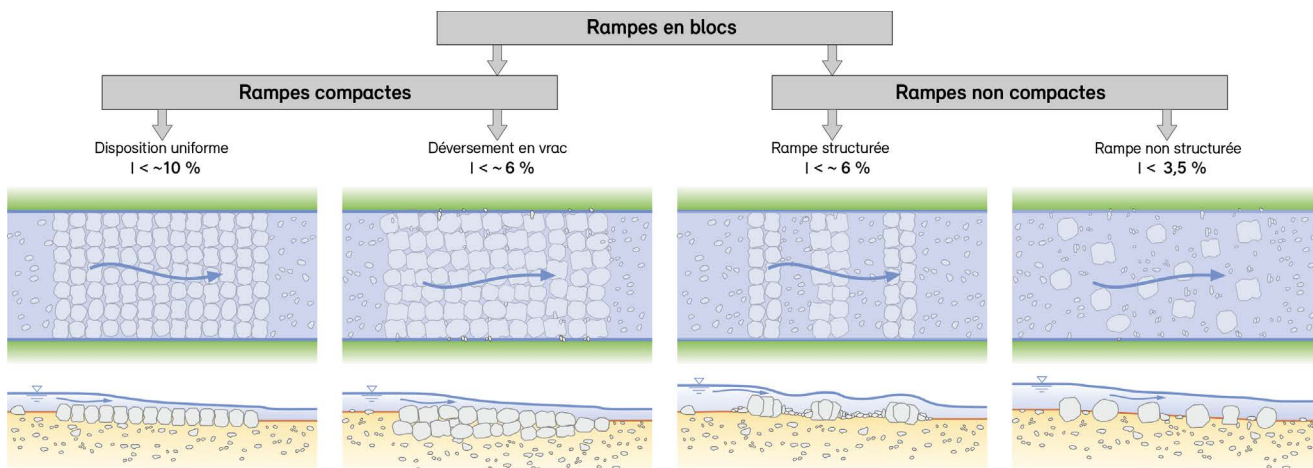


Fig. 20 : Types de rampes

À gauche, rampe à bassins avec des traverses à inclinaison alternante (« rampe à courant sinueux ») sur le Hauserkanal/Limmat (canton de Zürich) ; à droite, rampe non structurée sur la Wyna (canton d'Argovie).



Sources : V. Neuhaus (gauche), IUB Engineering AG (droite)

4.3.4 Cours d'eau de contournement

Un cours d'eau de contournement est un ouvrage de montaison aménagé de manière quasi naturelle, qui évite l'obstacle (fig. 21). Dans l'idéal, il débouche en amont de la queue de retenue de l'ouvrage transversal, de sorte que les poissons sont guidés jusqu'à un habitat de type « eaux courantes » (Seifert 2016).

Les cours d'eau de contournement sont surtout recommandés pour les sites offrant suffisamment de place pour accommoder la dénivellation (BMLFUW 2012, Seifert 2016). La pente doit être adaptée au type de milieu aquatique (tab. 8). Le débit ainsi que la nature et la forme du ruisseau doivent être adaptés au type et à la taille du cours d'eau (tab. 9).

Fig. 21 : Cours d'eau de contournement de la centrale de Ruppoldingen, avec différents types d'habitats



Source : A. Peter

Comme tous les ouvrages de montaison, un cours d'eau de contournement doit être dimensionné (spécifications hydrauliques et géométriques) de manière à respecter les exigences propres à la biologie piscicole (tab. 9). Seifert (2016, p. 68 s.) fournit des recommandations de base pour la planification et la construction. Le respect des valeurs limites doit être vérifié dans le cadre d'essais de fonctionnement. Des adaptations ultérieures sont presque toujours nécessaires ; elles sont généralement faciles à réaliser.

Dans le cas d'un cours d'eau de contournement, la difficulté tient généralement à la conception de l'entrée : contrairement aux ouvrages techniques, il est souvent compliqué d'installer l'entrée à proximité de l'obstacle à la migration.

Les fortes variations de niveau d'eau à l'aval posent également problème, car il n'est pas possible de rehausser si besoin des cloisons et des parois latérales (comme avec une passe à fentes verticales), ce qui signifie que le courant d'attrait provenant du cours d'eau de contournement est à peine perceptible lorsque le débit à l'aval est élevé (exhaussement). Afin d'améliorer la situation, le cours d'eau de contournement peut être combiné, dans sa zone d'entrée, avec un ouvrage technique (passe à fentes verticales), une rampe ou une passe à bassins rugueux. Dans ce cas, il est important que les spécifications géométriques et hydrauliques soient respectées également au niveau de la transition entre les deux ouvrages.

La zone de sortie d'un cours d'eau de contournement requiert une grande attention : de manière générale, une hausse de niveau d'eau à l'amont a pour effet d'augmenter la dotation, ce qui peut certes enclencher des processus dynamiques souhaités, mais également une surcharge hydraulique. Pour cette raison, il faut souvent prévoir l'installation d'éléments de contrôle du débit pour pouvoir compenser les variations de dotation (p. ex. coulisse horizontale, fente).

Dans les virages, le cours d'eau de contournement doit avoir un profil transversal asymétrique, avec une berge convexe s'aplatissant et une berge concave plus raide et plus profonde. Le débit se concentre ainsi le long du talweg (ligne de fond) de la berge concave et des zones calmes se forment au niveau de la berge plate.

Tab. 8 : Dimensions minimales garantissant la franchissabilité du cours d'eau de contournement en fonction de la zonation piscicole

Version simplifiée du tableau dans BMLFUW 2012.

Paramètre	Zonation					
	Zone supérieure de la truite	Zone inférieure de la truite	Zone à ombres	Zone à barbeaux	Eaux à truites lacustres	Eaux à saumons
Largeur min. du couloir de migration dans les gués [m]	0,23	0,3	0,38	0,41	0,53	0,48
Profondeur min. des cuvettes [m]	0,75	0,8	0,85	0,85	1,1	1
Profondeur d'eau moyenne min. dans le couloir de migration [m]	0,6	0,64	0,68	0,68	0,88	0,8
Largeur min. des gués [m]	1,35	1,75	2,2	2,5	3,7	2,9
Dotation min. [m ³ /s]	0,18	0,23	0,33	0,38	0,82	0,47

Tab. 9 : Valeurs limites pour la pente d'un cours d'eau de contournement

Paramètre	Débit moyen dans le cours d'eau principal [m³/s]	Valeur limite par zonation piscicole			
		Zone supérieure de la truite	Zone inférieure de la truite	Zone à ombres	Zone à barbeaux
Pente moyenne maximale du cours d'eau de contournement [%]	5	2,0 – 3,0	1,5 – 2,0	1,0 – 1,5	0,7 – 1,0
	10	1,5 – 2,5	1,0 – 1,5	0,8 – 1,0	0,6 – 0,8
	20	1,2 – 2,0	0,9 – 1,2	0,7 – 0,9	0,5 – 0,8
	50	1,0 – 1,5	0,8 – 1,0	0,6 – 0,8	0,5 – 0,7
	100	0,9 – 1,4	0,7 – 0,9	0,5 – 0,7	0,4 – 0,7
	200			0,4 – 0,6	0,3 – 0,6
	> 200				0,3 – 0,5

Source : Seifert 2016

Appréciation : les cours d'eau de contournement aménagés de manière quasiment naturelle remplissent d'autres fonctions écologiques en plus de la montaison des poissons. Ils servent d'aide à la migration et d'habitat pour la plupart des espèces et des classes d'âge (Calles & Greenberg 2007), en particulier de frayères et d'habitats de juvéniles pour les espèces piscicoles typiques des eaux courantes. Toutefois, après un temps assez court, ces fonctions disparaissent à cause des dépôts de sédiments et faute d'une bonne dynamique. Pour être durablement efficace sur le plan écologique, un cours d'eau de contournement ne doit pas seulement être aménagé dans le respect du type de milieu aquatique : des ajouts réguliers de graviers et une dotation dynamique sont également nécessaires pour garantir certains processus dynamiques (p. ex. le processus de déplacement de graviers). Cette dynamique peut toutefois entraver la migration piscicole si elle modifie la forme des seuils au point de les rendre infranchissables. Il y a donc lieu d'effectuer régulièrement des contrôles de fonctionnalité et, si besoin, d'apporter des améliorations ultérieures. Les zones amphibies et terrestres attenantes peuvent elles aussi être aménagées à des fins de valorisation écologique. En particulier dans les tronçons du cours d'eau qui sont fortement dénaturés, ces zones peuvent considérablement améliorer l'état écologique global (Seifert 2016).

4.3.5 Comparaison entre les cours d'eau de contournement et les ouvrages techniques de montaison

Cette section compare entre eux certains aspects des cours d'eau de contournement et des ouvrages techniques de montaison.

Matériau de construction, pente, tracé

Les cours d'eau de contournement sont principalement formés de matériaux naturels (grandes pierres, rochers, graviers, bois mort). En règle générale, leur pente est plutôt douce (Calles & Greenberg 2007). Pour contenir la pente, le tracé est souvent sinueux (virages ou méandres).

Efficacité d'attrait

Plusieurs études ont montré que les cours d'eau de contournement sont beaucoup plus difficiles à repérer que les passes techniques en raison d'une moindre efficacité d'attrait (Schneider & Hübner 2014). Cette dernière s'explique essentiellement par l'emplacement de la zone d'entrée, qui est rarement optimal. Selon d'autres études, un cours d'eau de contournement avec une *entrée* bien positionnée peut toutefois constituer une aide efficace à la montaison (Franklin et al. 2012).

Efficacité de passage

Les cours d'eau de contournement sont empruntés par un plus grand nombre d'espèces de poissons que les passes techniques (plus grande efficacité de passage). Ils conviennent en particulier aux poissons dont la nage est peu performante (Tummers et al. 2016, Bunt et al. 2012,

Noonan et al. 2012). Le passage peut toutefois être altéré par un débit trop faible et par une longueur de contournement excessive (Aarestrup et al. 2003). Des tassements ou des déplacements de blocs de pierre peuvent par ailleurs se produire et gêner le fonctionnement de l'ouvrage, ce qui est rarement le cas avec les passes techniques.

Habitats

Un cours d'eau de contournement a souvent une profondeur maximale moins importante que le cours d'eau naturel qu'il évite. En plus d'un *couloir de migration*, il met des habitats, des abris et des frayères à la disposition des poissons – aussi longtemps qu'ils ne sont pas recouverts par des sédiments fins. En comparant la faune piscicole présente dans des cours d'eau de contournement avec tronçons en amont et en aval, Pander et al. (2013) ont observé que les cours d'eau de contournement servaient d'habitats de protection (lieux de séjour lorsque les conditions sont défavorables). Ils offrent également des habitats pour les espèces de poissons *rhéophiles* dans les tronçons avec retenue. L'étude du cours d'eau de contournement de Ruppoldingen (Kaufmann 2012) a révélé une grande diversité d'espèces de poissons (22) et établi que l'ouvrage servait de zone de reproduction pour des *cyprinidés* (barbeaux, chevaines). Souvent, les cours d'eau de contournement constituent également des habitats de qualité pour les saumons et les truites de rivière (Armstrong et al. 2003) et pour certains macroinvertébrés (Lüderitz et al. 2017).

Comme il n'y a pas de déplacements dynamiques de graviers dans les cours d'eau de contournement, la sédimentation est un problème que se pose fréquemment et qui oblige souvent à procéder à des opérations de curage. Un cours d'eau de contournement n'est pas en mesure de compenser un important déficit d'habitats dans le cours d'eau principal. La décision d'aménager un tel ouvrage doit toujours être prise dans le contexte spécifique du site considéré.

Prédation

Les prédateurs affectionnent tous les ouvrages de montaison, y compris les cours d'eau de contournement. Pour protéger les poissons contre la prédation, les cours d'eau de contournement doivent être aménagés de telle sorte que leurs structures variées offrent des caches aux poissons.

Coûts

En règle générale, les coûts de construction, d'exploitation et d'entretien des cours d'eau de contournement sont moins élevés que ceux des ouvrages techniques construits en béton (Gebler 1998). Toutefois, les coûts d'entretien peuvent devenir conséquents en cas de sédimentation, d'atterrissement, d'apparition de macrophytes, de modification des berges ou de tassement des blocs de pierre.

Suivis des effets

Les publications spécialisées sont unanimes quant au fait que les cours d'eau de contournement ne sont pas suffisamment contrôlés. Des relevés réalisés au moyen d'une pêche électrique fournissent des informations spécifiques au site et à des instants précis, mais ils ne permettent pas de déterminer clairement si les poissons stationnent longuement dans un cours d'eau de contournement ou s'ils se contentent de le franchir. Pour clarifier ce point, des analyses plus poussées sont nécessaires et un contrôle doit être mis en place dès la phase de planification grâce à des outils adaptés (bassins de comptage, antennes pour PIT-tags). À l'avenir, il y a lieu de procéder à des suivis des effets plus complets. S'agissant du cours d'eau de contournement de Ryburg-Schwörstadt sur le haut Rhin, Schwevers et al. (2019) ont observé que les deux *entrées* de l'ouvrage sont facilement repérées par les poissons mais que l'efficacité de passage est très faible.

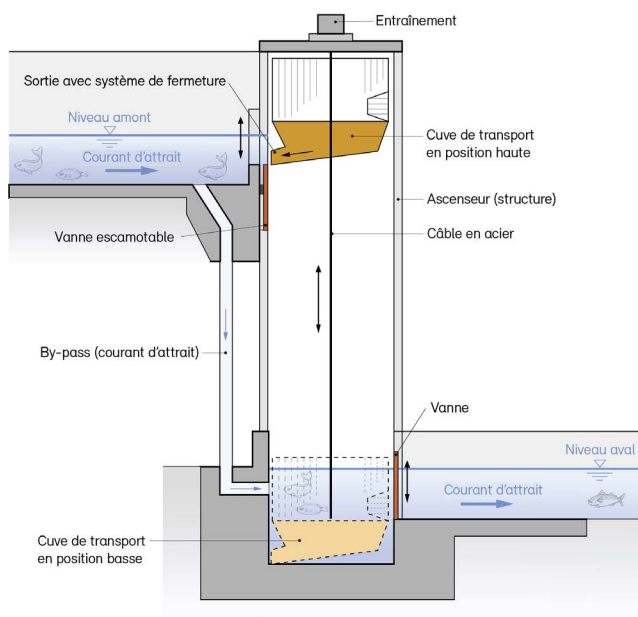
4.3.6 Ascenseur à poissons

Un ascenseur à poissons est un ouvrage technique qui transporte les migrateurs vers le *bief amont* sans qu'ils aient à utiliser leur propre force, ou seulement en très faible proportion (fig. 22). Ce type de construction convient aux ouvrages de retenue de toute hauteur et occupe un minimum d'espace. En Suisse, plusieurs ouvrages hydro-électriques situés sur la Birse, la Sarine et la Gadmerwasser sont équipés d'un ascenseur à poissons.

Pendant la phase de piégeage, un *courant d'attrait* guide les poissons vers une cage de capture dont la taille dépend de l'*espèce cible* (tab. 10). Ce courant, généralement injecté depuis le *bief amont*, traverse la cage. Pour que les poissons ne puissent pas s'échapper, l'entrée de la cage est équipée d'une grille anti-retour. Cette grille est mobile et sert en même temps de grille de guidage : cycliquement, elle se referme et avance en direction de la cuve

Fig. 22 : Structure et principe de fonctionnement d'un ascenseur à poissons

D'après Travade & Larinier 1992, dans DWA 2016.



de transport pour obliger les poissons à nager de la cage à la cuve. Pour les petits cours d'eau, il est possible d'utiliser des systèmes plus simples dans lesquels la cuve de transport sert en même temps de cage (p. ex. barrage de la Maigrauge sur la Sarine, dans le canton de Fribourg).

Tab. 10 : Spécifications géométriques de la cage d'un ascenseur à poissons en fonction de l'espèce cible (Pavlov 1989 ; dans DWA 2016)

Paramètre	Espèce cible	
	Truite	Saumon
Longueur [m]	> 1,5	> 2,5
Largeur [m]	> 1,0	> 1,5
Hauteur [m]	> 0,8	> 1,0
Volume [m ³]	> 1,2	> 4,0

Un système à treuil remonte la cuve de transport jusqu'au-dessus du niveau de l'eau à l'amont. Grâce à ce système, l'ascenseur à poissons convient également dans les endroits où le niveau d'eau peut fortement varier. Pendant la phase de remontée, les poissons se trouvent dans

le fond de la cage remplie d'eau. Lorsque la cuve atteint sa position finale, elle déverse l'eau et les poissons dans une conduite qui débouche dans le bief amont. Elle redescend ensuite vers sa position initiale, et une nouvelle phase de piégeage commence.

Le cycle de rotation doit être déterminé sur la base des contrôles et, si besoin, être adapté en fonction de la saison. En général, un cycle peut durer dix minutes à quatre heures.

Appréciation : les ascenseurs à poissons installés sur différents sites ont fait preuve d'efficacité concernant les espèces anadromes ; en revanche, les espèces de fond avec une nage peu performante sont sous-représentées dans les chiffres de montaison (DWA 2016). Ce qui pose principalement problème avec les ascenseurs, ce sont les fortes variations de niveau dans le bief aval ; elles doivent être compensées par exemple grâce à l'installation complémentaire d'une passe à fentes verticales et/ou par une *dotation supplémentaire*. Il semble très improbable de pouvoir utiliser les ascenseurs pour la dévalaison également. Comme toutes les constructions spéciales, l'ascenseur a pour inconvénient majeur de posséder un fonctionnement discontinu, ce qui retarde la migration des poissons. Il est par ailleurs sélectif, comme tous les systèmes de capture, et cause un stress aux animaux capturés. Pour pallier ces défauts, il faut prévoir des passages ou des grilles de guidage à nasses, ce qui augmente les coûts d'entretien. Il est également possible d'utiliser alternativement deux ascenseurs installés côte à côte.

4.3.7 Écluse à poissons

L'écluse à poissons est un ouvrage qui utilise le principe de l'écluse pour permettre aux poissons de franchir des retenues d'eau. Elle se compose d'une chambre et de deux vannes de fermeture à l'aval et à l'amont. La dénivellation entre les biefs aval et amont est franchie en totalité à l'intérieur de la chambre.

On distingue plusieurs types d'écluses à poissons (p. ex. Borland, Pavlov, Deelder, écluse avec chambre à pression), qui ont toutes en commun leur faible encombrement et peuvent donc être construites dans des espaces restreints (DWA 2016). En Suisse, il existe des écluses à pois-

sons sur l'Aar à Interlaken (canton de Berne) et sur la Glatt (canton de Saint-Gall).

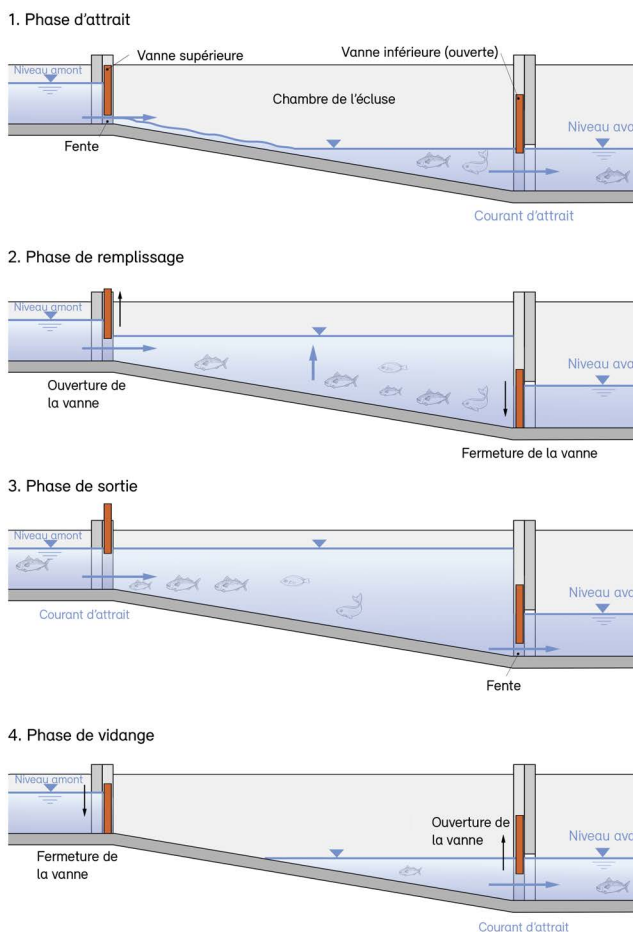
Le cycle d'une écluse piscicole se décompose en quatre phases (fig. 23) :

1. phase d'attrait : la vanne inférieure (à l'aval) est ouverte, si bien que le niveau d'eau dans la chambre de l'écluse correspond à celui du *bief aval*. La vanne supérieure à moitié ouverte crée un *courant d'attrait* qui sort par la vanne inférieure et guide les poissons vers la chambre ;
2. phase de remplissage : après un temps donné, la vanne inférieure se ferme, puis la vanne supérieure s'ouvre ; la chambre se remplit ainsi d'eau jusqu'à ce que son niveau atteigne celui du *bief amont* ;
3. phase de sortie : lorsque les niveaux d'eau dans la chambre et dans le *bief amont* sont identiques, la vanne supérieure (à l'amont) s'ouvre entièrement tandis que la vanne inférieure s'ouvre partiellement. Cela crée un *courant d'attrait* qui guide les poissons vers le *bief amont* ;
4. phase de vidange : lorsque les poissons ont eu suffisamment de temps pour sortir de la chambre, la vanne supérieure se referme entièrement et la chambre se vide par la vanne inférieure. La prochaine phase d'attrait commence quand le niveau d'eau dans la chambre est redescendu jusqu'au niveau d'eau à l'aval.

La commande des vannes et donc des quatre phases est automatisée. La durée optimale d'un cycle doit être déterminée sur la base du suivi de la montaison.

Appréciation : selon leur disposition, leur dimension et leur type, les écluses à poissons peuvent atteindre des chiffres de montaison élevés, mais elles sont parfois sélectives en matière d'espèces et ont un faible rendement (DWA 2016). En raison des incertitudes qui subsistent, un jugement définitif est impossible à ce jour. Comme il s'agit d'un ouvrage à fonctionnement discontinu, des aménagements doivent être réalisés pour empêcher les poissons de faire demi-tour. Comme toutes les constructions spéciales,

Fig. 23 : Principe de fonctionnement d'une écluse à poissons
D'après DWA 2016, mod.



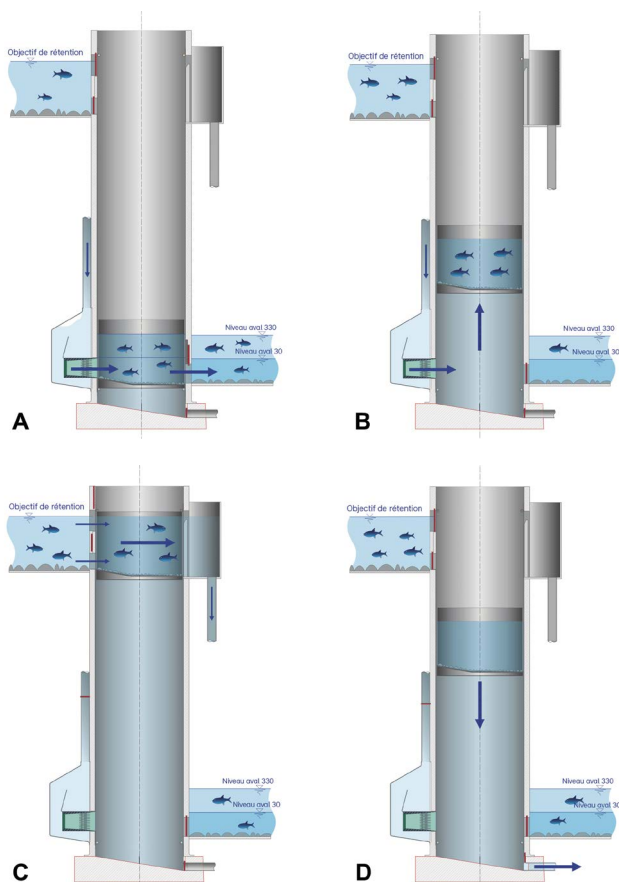
une écluse à poissons doit être envisagée uniquement si un ouvrage à fonctionnement continu est irréalisable avec des moyens proportionnés (cf. point 4.3).

4.3.8 Écluse à poissons avec ascenseur

L'écluse à poissons avec ascenseur est un ouvrage mixte dans lequel une cuve de transport équipée de flotteurs monte et descend à l'intérieur d'un puits rempli d'eau. Elle ne nécessite ni énergie de tiers ni mécanisme de levage. Un cycle se décompose en quatre phases : attrait, remplissage, sortie et vidange (fig. 24). La Suisse ne compte actuellement aucun ouvrage de ce genre.

Fig. 24 : Fonctionnement d'une écluse à poissons avec ascenseur (système « Hydro-Fischlift »)

A) phase d'attrait, B) phase de remplissage, C) phase de sortie, D) phase de vidange (d'après Hydro-Energie Roth GmbH 2015, mod.).



Appréciation : grâce à son puits vertical, cet ouvrage est encore moins encombrant qu'une écluse à poissons et se prête, comme cette dernière, aux situations de fortes variations du niveau d'eau du bief amont. Contrairement à l'écluse simple cependant, l'écluse avec ascenseur a pour avantage que les poissons n'ont pas besoin de nager activement à contre-courant mais qu'ils se laissent remonter passivement à l'intérieur d'une cuve ; le risque que les poissons ne sortent pas de la cuve lors de la dernière phase est donc moindre. Comme toutes les constructions spéciales à fonctionnement discontinu, des questions se posent quant à l'efficacité de cet ouvrage. D'autres incertitudes subsistent encore en raison du peu de retours d'expériences acquis à ce jour.

Fig. 25 : Passe à poissons Denil nouvellement installée sur la Mearley Brook, en Angleterre



Source : J. Spees

4.3.9 Autres ouvrages

4.3.9.1 Passe à poissons Denil

La passe Denil a été développée au début du XX^e siècle. Elle se compose d'un chenal rectiligne dans lequel des lamelles inclinées contre le sens du courant sont disposées à distance régulière et relativement rapprochée (fig. 25). Entre les lamelles se forme un courant de retour qui provoque une forte dissipation d'énergie. Il en résulte une vitesse d'écoulement relativement lente dans la partie inférieure des sections délimitées par les lamelles. Des informations plus détaillées sont disponibles dans DWA (2016, p. 257 s.).

Appréciation : la passe à poissons Denil peut avoir une inclinaison maximale d'environ 20 %. Dans les endroits exigus, elle constitue donc une solution peu coûteuse pour rétablir la migration des grands salmonidés habitués aux courants forts. Son défaut principal est de ne pas convenir aux juvéniles ni aux poissons de petite taille. Comme elle s'obstrue très facilement, elle nécessite un entretien rigoureux. La passe Denil peut éventuellement compléter un ouvrage de montaison pleinement fonctionnel mais sous-dimensionné pour les grands salmonidés.

Fig. 26 : Passe à bassins successifs

Passe à bassins successifs au niveau de la centrale du Moulin des Roches (Birse, canton du Jura) avec différentes hauteurs de chute entre bassins en raison des embâcles.



Source : M. Mende

4.3.9.2 Passe à bassins successifs

La passe à bassins successifs est un ouvrage classique dont il existe de nombreuses réalisations dans la région germanophone. Elle ressemble beaucoup à une passe à fentes verticales, si ce n'est que ses cloisons ont soit une ouverture proche de la surface (échancre), soit une ouverture proche du fond, soit les deux.

Appréciation : si elles sont correctement conçues, disposées et entretenues, les passes à bassins successifs sont des ouvrages de montaison efficaces. Elles sont toutefois plus sensibles aux variations de niveau que les passes à fentes verticales et elles sont nettement plus exposées au phénomène d'embâcle (fig. 26). Elles nécessitent donc beaucoup d'entretien – raison pour laquelle elles ne peuvent plus être recommandées de nos jours.

4.3.9.3 Passe à brosses

Dans une passe à brosses, plusieurs blocs de brosses fixés au fond du chenal ont pour fonction d'absorber l'énergie hydraulique. Dans les dix années qui ont suivi les premiers essais réalisés en 2000, quelque 50 installations de ce type ont été construites à travers le monde – dont la plupart en Allemagne et quelques-unes en Suisse.

À l'origine, les brosses étaient réparties uniformément sur le fond de la passe à poissons ; aujourd'hui, elles sont disposées par groupe de deux ou trois, ce qui a pour effet de créer une structure en bassins qui permet également la montaison des grands poissons (fig. 27, à gauche).

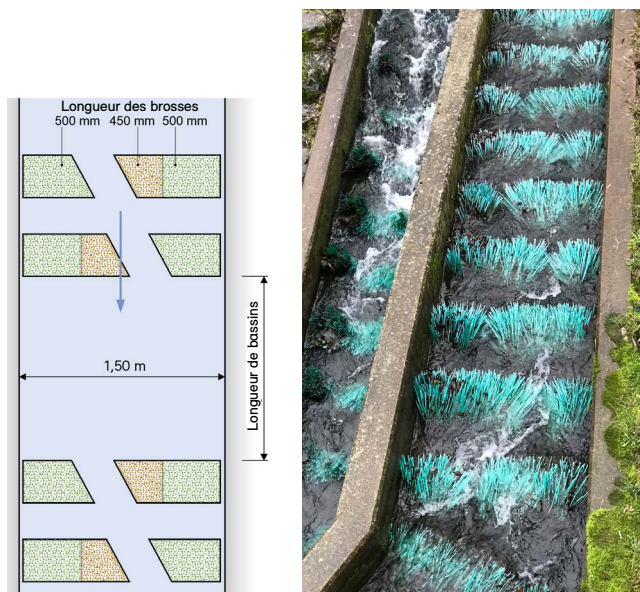
D'après Hassinger (2009), le fait qu'il n'existe quasiment aucun courant transversal dans les bassins évite aux poissons de devoir effectuer des mouvements de compensation, si bien qu'une longueur de bassin égale à 1,5 fois la longueur de poisson est suffisante. Les longueurs et les largeurs de bassin sont donc deux fois plus petites que celles des passes classiques à fentes verticales, et les pentes deux fois plus raides. Comme plus de 50 % de la dissipation s'effectue dans les brosses, les valeurs limites pour la *dissipation énergétique* dans les bassins (voir plus haut) ne sont pas dépassées malgré une plus grande déclivité (Hassinger 2009).

Cette importante dissipation nécessite toutefois que les brosses restent propres dans une large mesure. Quel que soit le site considéré, les blocs de brosses ont toujours tendance à s'obstruer (fig. 27, à droite). Pour préserver le fonctionnement de l'ouvrage, il faut donc prévoir un entretien intensif.

Appréciation : la passe à brosses se caractérise par un grand besoin d'entretien, quel que soit le cours d'eau dans lequel elle est installée. Si les brosses ne sont pas entretenues continuellement, elles s'obstruent rapidement au point de ne plus remplir leur fonction, ou seulement de façon limitée.

Fig. 27 : Passe à double rangée de brosses

À gauche, exemple avec 1,5 m de largeur, d'après Hassinger 2009 (mod.) ; à droite, passe à brosses au niveau de la centrale de Bellerive sur la Birse (canton du Jura).



Source : M. Mende, droite

4.3.9.4 Vis de montaison

Les ouvrages de montaison à vis sans fin sont utilisés principalement en Autriche et en Bavière. La Suisse ne compte actuellement aucun ouvrage technique de ce genre. Au total, 28 installations ont été réalisées, sont autorisées ou sont en cours d'autorisation (ezb 2017). Le système repose sur le principe de la vis d'Archimède (vis sans fin). Il existe deux types de construction : une simple vis de montaison, souvent combinée à une vis hydrodynamique fonctionnant en parallèle (système Rehart/Strasser, fig. 28) ; un ouvrage à deux vis concentriques (système Hydro-Connect), avec une vis extérieure servant à la production d'énergie et éventuellement à la dévalaison et une vis intérieure servant à la montaison.

Appréciation : des études portant sur des eaux à barbeaux montrent clairement que des vis de montaison garantiraient seulement de façon insuffisante la circulation des migrateurs de moyenne distance (p. ex. barbeaux et nases) (ezb 2017), ce qui pourrait s'expliquer par le comportement grégaire de beaucoup de ces espèces. De manière générale, on peut même se demander si une vis de montaison est adaptée aux groupes de grands poissons adultes. Pour

cette raison, ce type d'ouvrage est déconseillé dans l'état actuel des connaissances. Il peut éventuellement convenir pour des eaux à truites de rivière, mais les expériences faites à ce jour sont très limitées.

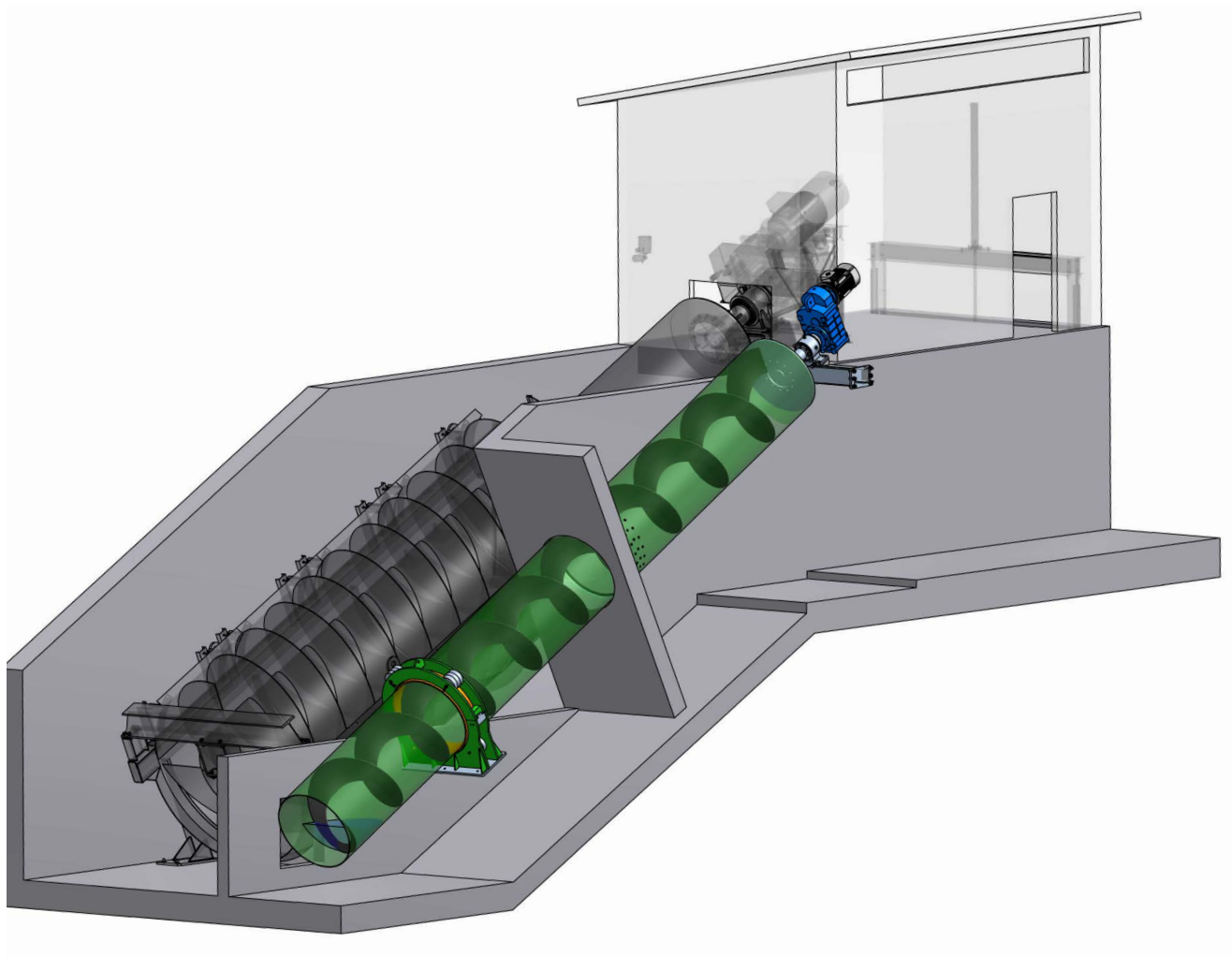
4.3.9.5 Passe à anguilles

La passe à anguilles est un ouvrage spécialement adapté à la très faible performance de nage des civelles et des anguillettes. Pour cette raison, elle est souvent installée en complément d'une passe à poissons.

Les anguillettes se déplacent en surface et ont une capacité de nage restreinte. Mais elles sont parfaitement capables de ramper sur des surfaces humides (DWA 2016). Pour permettre ce type de montaison, on a longtemps équipé les ouvrages de retenue avec des chenaux et des conduits remplis de fagots. Aujourd'hui, la plupart des passes à anguilles se composent d'un chenal ouvert (de 20 à 30 cm de largeur) dans lequel sont fixées de petites brosses à filaments synthétiques. Dans le *couloir de migration* de ces passes, la profondeur d'eau requise est seulement de quelques millimètres, et le débit de quelques litres par seconde. Des informations plus détaillées sont disponibles dans DWA (2016, p. 273 ss).

Appréciation : puisque les anguillettes ont une capacité de nage insuffisante pour franchir la plupart des ouvrages de montaison, les passes à anguilles peuvent apporter une contribution nécessaire à la protection de l'animal dans les secteurs où de jeunes anguilles sont observées ou attendues.

Fig. 28 : Schéma d'une vis de montaison de type Rehart/Strasser (en vert) combinée à une vis hydrodynamique



Source : entreprise Rehart

4.3.9.6 Système de capture et de transport

Un système de capture et de transport peut être utilisé dans de rares cas, lorsque la présence de restrictions empêche le rétablissement de la migration à moyen terme. Le système consiste à capturer des poissons en montaison (et parfois aussi des poissons en dévalaison) avant l'*obstacle à la migration*, à les transférer dans un véhicule (p. ex. camion-citerne, bateau) et à les transporter suffisamment loin pour qu'ils puissent poursuivre leur migration. Sont principalement concernées les espèces présentant un grand intérêt pour la pêche (DWA 2016).

Appréciation : les systèmes de capture et de transport causent beaucoup de stress aux poissons capturés, détenus et transportés et ils enregistrent une mortalité accrue. Ils sont sélectifs et ils imposent aux poissons un changement de lieu qui ne tient pas compte de leur véritable destination migratoire, ce qui peut les désorienter et/ou les amener à interrompre leur migration. Par ailleurs, ils ne permettent pas de transporter de grandes quantités de poissons. En matière de prévention des épidémies, ces systèmes suscitent de très vives inquiétudes puisqu'ils transportent des poissons dont l'état de santé est inconnu.

Enfin, ils génèrent des coûts opérationnels et d'installation importants, ce qui mobilise des ressources précieuses et retarde la construction d'un véritable ouvrage de montaison garantissant durablement la libre migration des poissons (Schneider 2017).

4.4 Mesures d'exploitation

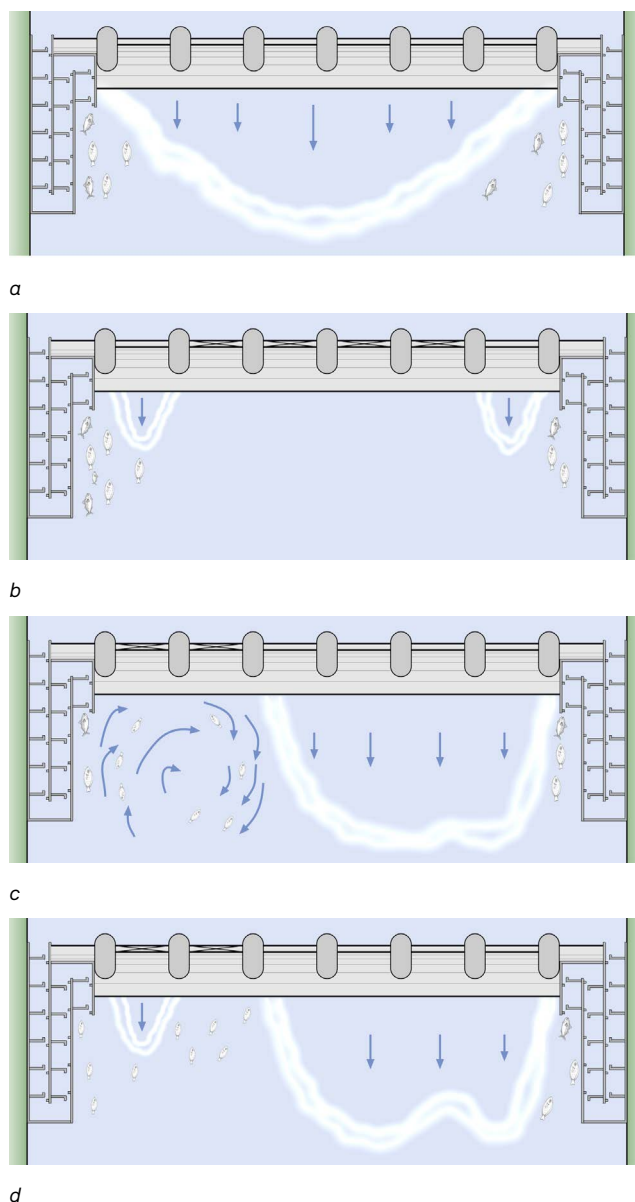
L'exploitation d'un barrage ou d'une centrale peut être optimisée de manière à rendre l'ouvrage de montaison plus facile à repérer et à franchir. Cette optimisation peut toutefois engendrer des inconvénients (p. ex. différent niveau d'usure des turbines, affouillements indésirables et érosion des berges dans le *bief aval*).

La repérabilité de l'ouvrage de montaison dépend fortement des conditions de courant dans le *bief aval*, de la gestion des vannes et des turbines, ainsi que du sens de rotation des turbines. Les courants produits par l'exploitation de l'installation ne doivent pas détourner les poissons de l'*entrée* de l'ouvrage de montaison. Dans la mesure du possible, la gestion des vannes et des turbines doit être adaptée de manière à guider les poissons vers la zone d'*entrée* (fig. 29). La repérabilité peut être améliorée de façon ciblée grâce à une gestion adaptée, ce qui implique d'analyser en détail l'impact hydraulique du régime d'exploitation en fonction du site.

Pour améliorer la franchissabilité d'un obstacle en pleine période de migration (qui dépend du site), une vanne peut temporairement être laissée complètement ouverte. Les poissons peuvent ainsi franchir l'obstacle directement et dans les deux sens, pour autant que les conditions hydrauliques ne dépassent pas les capacités de nage des espèces cibles. Il faut alors s'assurer que la montaison des migrants de fond est elle aussi possible et garantie.

Fig. 29 : La gestion ciblée des vannes permet d'améliorer la repérabilité de l'ouvrage de montaison

Les figures (a) et (b) sont représentatives d'une gestion optimale : l'eau restituée par les vannes favorise la repérabilité des entrées de l'ouvrage. (a) : les poissons remontant le courant principal sont guidés vers les entrées de l'ouvrage par un courant qui diminue progressivement en direction des berges. (b) : le fait d'ouvrir seulement les vannes situées aux extrémités de l'ouvrage évite de guider les poissons vers le milieu du cours d'eau en période d'étiage. (c) : la gestion des vannes crée des remous indésirables au niveau d'une berge, dans la zone d'accès de l'ouvrage de montaison. (d) : la gestion des vannes crée une zone calme au milieu du cours d'eau, ce qu'il faut éviter (d'après Larinier 2002, mod.).



5 Dévalaison

S’agissant de la protection des poissons en dévalaison, le développement de mesures adéquates n’en est encore qu’à ses débuts, même si diverses technologies ont été testées et de nombreuses connaissances acquises ces dernières années. Ainsi, un système composé d’une grille horizontale et d’un by-pass est désormais la norme pour les ouvrages à faible débit d’équipement. Les retours d’expérience dont on dispose actuellement en Suisse concernent des débits allant jusqu’à 100 m³/s (centrale de Dietikon sur la Limmat). Pour des installations plus grandes, il n’est actuellement pas possible de faire des recommandations standard à propos de la dévalaison.

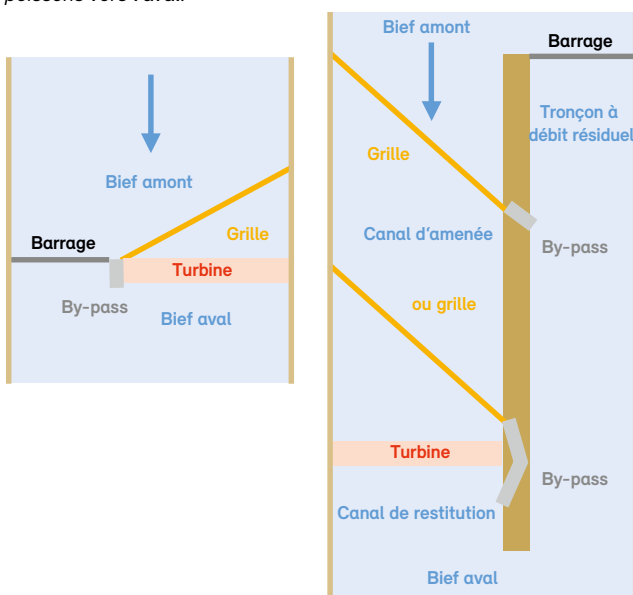
Les paramètres pertinents pour la dévalaison sont résumés au point 5.2.

5.1 Protection et guidage des poissons

Les mesures d’aide à la dévalaison visent plusieurs objectifs : permettre aux poissons de passer en aval d’une

Fig. 30 : À gauche, principe de protection et de guidage des poissons dans une centrale au fil de l’eau ; à droite, centrale avec dérivation

Dispositions typiques en matière de grille et de by-pass. À noter qu’il existe également d’autres moyens d’assurer la libre migration des poissons vers l’aval.



centrale hydraulique en toute sécurité via un *couloir de migration* (p. ex. un *by-pass*, une vanne ou à la rigueur un ouvrage de montaison) (fig. 30) ; empêcher les poissons de pénétrer dans les turbines ou d’être blessés durant le passage par le barrage ; guider les poissons dans le *couloir de migration* qu’ils ne trouveraient que difficilement par eux-mêmes. Les différentes technologies de protection des poissons (tab. 11) doivent être coordonnées entre elles (p. ex. guider les poissons dans un *by-pass* à l’aide d’une grille) afin que la libre migration des poissons vers l’aval puisse être assurée.

Tab. 11 : Technologies de protection des poissons aux installations hydroélectriques

Concept	Type de mesure	Exemples
Écran	Barrières mécaniques	Grille fine (espacement libre des barres ≤ 20 mm ; grille verticale, horizontale, à câbles, Coanda)
	Barrières comportementales mécaniques	Bar racks Louver Paroi plongeante Sillon aménagé sur le fond
	Barrières comportementales sensorielles	Lumière Son Flux induit (champs d’écoulement générés) Champs électriques Rideau de bulles
	Barrières comportementales mécaniques et sensorielles	Grille fine électrifiée
Dérivation	Systèmes collecteurs	Gouttière collectrice proche de la surface Ascenseur à poissons Système de by-pass
Transfert	Passage du barrage vers l’aval	Barrage à surverse : faible hauteur de chute, grande profondeur du bassin d’amortissement Barrage à sousverse : faible vitesse d’écoulement, diminution lente de la pression
	Turbines adaptées aux poissons	Minimum Gap Runner Turbine Alden Turbine « low head » (turbine LH) Turbine « very low head » (turbine VLH) Vis hydrodynamique
	Exploitation adaptée aux poissons	Gestion des turbines Abaissement des vannes Ouverture des vannes Ouverture de la vanne de purge

Les exigences imposées aux systèmes de protection et de guidage des poissons sont définies ci-après. Les valeurs caractéristiques à observer figurent dans le tableau 13 du point 5.2.

5.1.1 Barrières

La protection contre le passage dans les turbines et le guidage des poissons vers la passe se fait généralement au moyen de barrières mécaniques. Il s'agit soit de barrières physiques qui empêchent les poissons de pénétrer dans la prise d'eau (grilles fines, point 5.1.1.1), soit de barrières comportementales (bar racks, paroi plongeante, sillon aménagé sur le fond, etc. ; point 5.1.1.5). Notons que les barrières physiques ont également des caractéristiques de barrière comportementale et les barrières comportementales, des caractéristiques de barrière physique. Les barrières non mécaniques (lumière, son, électricité, bulles d'air) sont utilisées beaucoup moins fréquemment. Elles sont purement comportementales et ne sont recommandées qu'en combinaison avec des barrières mécaniques (point 5.1.1.6).

5.1.1.1 Grilles fines

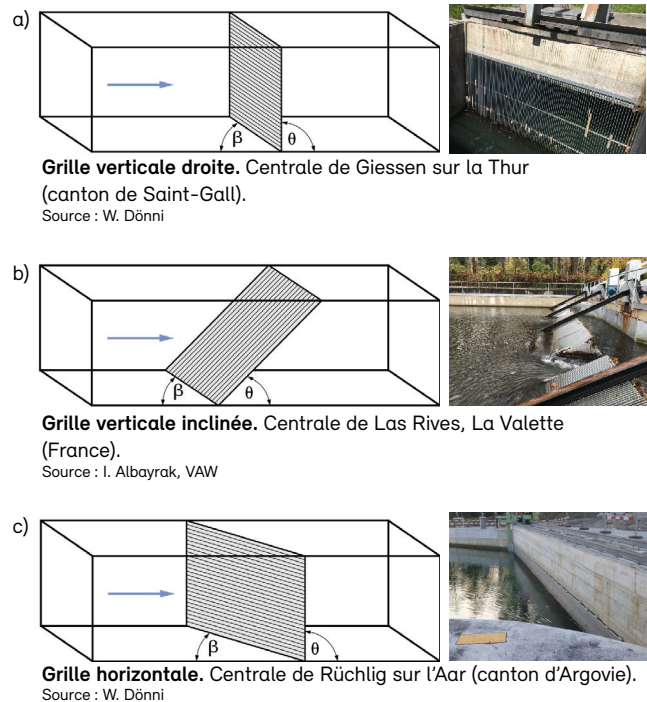
Au niveau des centrales hydroélectriques, les grilles à faible espacement des barres (≤ 20 mm, grilles fines) offrent la plus grande protection aux poissons en dévalaison. Elles sont par conséquent au centre de notre attention. En fonction de l'exposition au courant, on distingue les types de grilles suivants (fig. 31) :

- *grille verticale droite* (point 5.3.2) : grille avec des barres verticales placées plus ou moins perpendiculairement au courant (angle d'inclinaison vertical $\theta > 75^\circ$) souvent appelée « grille conventionnelle » ;
- *grille verticale inclinée* (point 5.3.2) : grille inclinée verticalement en direction du courant, soit du lit (angle d'inclinaison vertical $\theta < 45^\circ$), avec des barres verticales, souvent appelée « grille plate » ;
- *grille horizontale* (point 5.3.1) : grille équipée de barres placées horizontalement par rapport au courant⁶, disposée en oblique par rapport à celui-ci (angle d'incidence horizontal $\beta < 45^\circ$), souvent appelée « grille oblique » ou « grille de guidage ».

⁶ Les grilles disposées horizontalement par rapport au courant avec des barres verticales sont appelées louvers (écrans à persiennes) ou bar racks (point 5.3.4).

Fig. 31 : Orientation de la grille fine face au courant

Schéma d'après Ebel 2018, p. 141, mod.

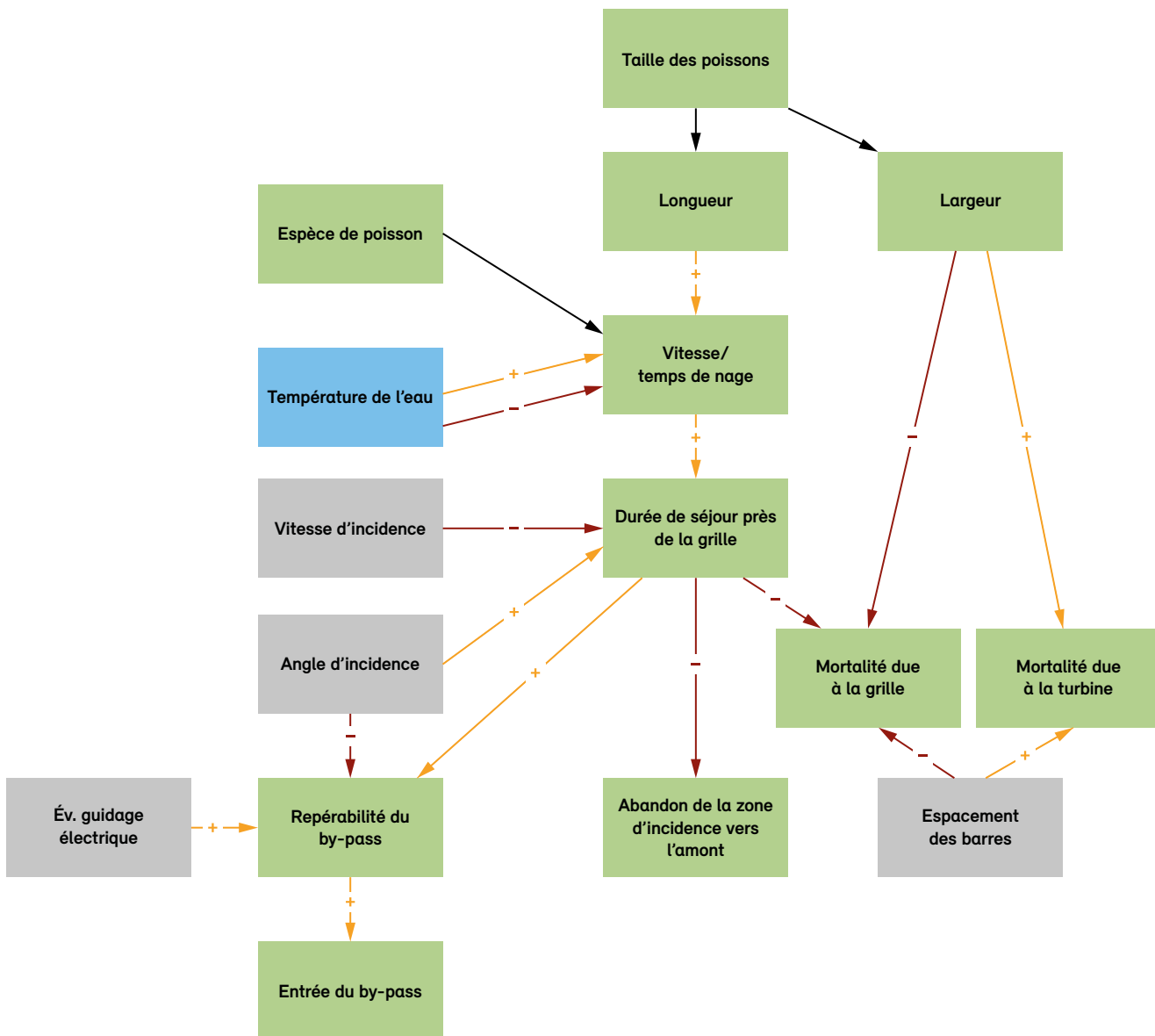


5.1.1.2 Effet protecteur

L'effet protecteur d'une grille ou le risque de blessure associé résulte de la combinaison de divers paramètres (fig. 32). La taille des poissons est définie par la longueur et la largeur du corps. Les poissons plus longs atteignent des vitesses plus grandes (vitesse de croisière) ou nagent plus longtemps que les poissons moins longs, les vitesses et les durées exactes dépendant de l'espèce et de la température de l'eau (point 3.1.2). Selon leurs capacités natatoires, les poissons peuvent rester plus ou moins longtemps à proximité de la grille, le temps de séjour diminuant à mesure que la vitesse d'écoulement incidente augmente. Plus le temps de séjour possible est court, plus le risque est grand que les poissons soient plaqués contre la grille, qu'ils passent à travers (selon la largeur du corps), ou alors qu'ils nagent en amont et quittent la zone de la grille, sans trouver l'exutoire. Plus le temps de séjour possible est long, plus les poissons ont le temps de trouver l'entrée du *by-pass*. Une orientation optimale de la grille (selon l'angle d'incidence) – éventuellement couplé à un champ électrique – améliore la fonction de guidage et leur permet de trouver l'entrée du *by-pass* plus rapidement.

Fig. 32 : Principe de protection des poissons par une grille

Gris = facteurs techniques, vert = facteurs biologiques, bleu = facteurs environnementaux. + = corrélation positive, - = corrélation négative.



La franchissabilité physique de la grille est déterminée par la largeur du corps du poisson ainsi que par l'**espacement des barres**. En principe, l'espacement libre doit être choisi de manière à ce que le passage physique des poissons cibles ne soit pas possible. Cependant, empêcher le passage de l'ensemble des petits poissons est impossible, les barrières avec un espacement des barres de quelques millimètres n'étant pas compatibles avec une exploitation économique des centrales hydrauliques.

Pour la grande majorité des poissons, la largeur du corps l_p est le facteur décisif en ce qui concerne l'effet protecteur d'une *grille verticale* avec un espacement de barre donné sb (tab. 12). Dans le cas d'une *grille horizontale*, il s'agit de leur hauteur, mais les poissons pouvant « basculer », la largeur du corps importe également. Meister (2020) fournit la formule suivante, établie sur la base d'essais de laboratoire, pour estimer l'efficacité de la protection d'une *grille horizontale* :

Efficacité de la protection [%] = $150 l_p / s_b - 50$
(champ d'application : $0,33 \leq l_p / s_b \leq 1$)

En principe, l'espacement libre maximal admissible des barres dépend du niveau acceptable de mortalité dû aux turbines ou, en d'autres termes, du taux de survie souhaité pour les poissons cibles. Étant donné que la mortalité due aux turbines ne peut pas, sauf pour l'anguille et le saumon, être calculée de manière adéquate à l'aide des approches de modélisation actuellement disponibles (point 5.1.3), les valeurs limites admissibles sont définies sur la base de l'expérience acquise à ce jour. Ainsi, un espacement maximal de 15 mm entre les barres s'applique aux *grilles verticales et horizontales*. Une compilation de l'effet de protection des grilles fines avec différents espacements de barres pour différentes espèces de poissons figure dans le tableau 12.

Il est difficile d'éviter la présence de poissons dans les **canaux d'amenée** au moyen d'une grille fine installée à l'entrée, les petits poissons pouvant passer à travers. Si les poissons grandissent dans le canal, ils ne peuvent plus passer à travers la grille à partir d'une certaine taille et ne peuvent donc quitter le canal que par la turbine. Dans ce genre de cas, il faudrait envisager de retirer régulièrement les poissons piégés.

Les grilles fines peuvent causer énormément de dommages aux poissons si les **vitesses d'écoulement incidentes (vitesses d'incidence)** sont trop élevées, notamment lorsque l'incidence est frontale. Les poissons sont alors plaqués contre la grille, ne peuvent plus s'en détacher et peuvent rester coincés entre les barres. Un risque de blessure est également lié au passage à travers la grille.

Une protection élevée requiert un faible espacement libre entre les barres et une absence de perturbations hydrodynamiques locales causées par des éléments en saillie (p. ex. des éléments de support verticaux) ou des dépôts de matières charriées. Ces éléments peuvent influencer le comportement et conduire à un transit à travers la grille.

La vitesse d'incidence moyenne dans le canal d'amenée immédiatement en amont de la grille est indépendante de l'orientation et de la conception de celle-ci ; elle est donc

Tab. 12 : Effet de protection des grilles fines avec différents espacements des barres pour certaines espèces de poissons indigènes. Largeur relative du corps = largeur du corps/longueur

Espèce de poisson	Largeur relative du corps	Longueur maximale du poisson [cm] pour différents espacements des barres de la grille			
		10 mm	15 mm	20 mm	25 mm
Anguille	0,03	33	50	67	83
Chevaine	0,17	6	9	12	15
Ombre	0,10	10	15	20	25
Petite lamproie	0,05	20	30	40	50
Barbeau	0,12	8	13	17	21
Brème franche	0,10	10	15	20	25
Truite	0,10	10	15	20	25
Perche	0,17	6	9	12	15
Chabot	0,13	8	12	15	19
Vandoise	0,10	10	15	20	25
Brochet	0,10	10	15	20	25
Saumon	0,10	10	15	20	25
Ablette	0,09	11	17	22	28
Nase	0,16	6	9	13	16
Gardon	0,15	7	10	13	17
Tanche	0,15	7	10	13	17
Loche franche	0,05	20	30	40	50
Spirilin	0,09	11	17	22	28
Blageon	0,09	11	17	22	28
Lotte	0,18	6	8	11	14
Silure	0,15	7	10	13	17
Sandre	0,12	8	13	17	21

(Données tirées de DWA 2016, p. 117-118, et LUBW 2016, p. 20). Des valeurs légèrement différentes figurent dans Schwevers & Adam (2020, p. 139).

indépendante de l'angle d'incidence. Elle peut être facilement calculée :

$$U_o = Q / A$$

Au niveau de la grille, elle se décompose en deux vecteurs :

$$v_n = \sin\theta \text{ ou } \sin\beta \times U_o$$

$$v_t = \cos\theta \text{ ou } \cos\beta \times U_o$$

où

U_o = vitesse d'incidence moyenne
 Q = débit
 A = section verticale de l'écoulement
 v_n = vitesse normale
 v_t = vitesse tangentielle
 β = angle d'incidence (horizontal)
 θ = angle d'inclinaison (vertical)

Ces deux vecteurs dépendent de l'angle d'inclinaison ou d'incidence (angle θ ou β sur la fig. 31). La composante normale est perpendiculaire au plan de la grille, la composante tangentielle est parallèle à celui-ci.

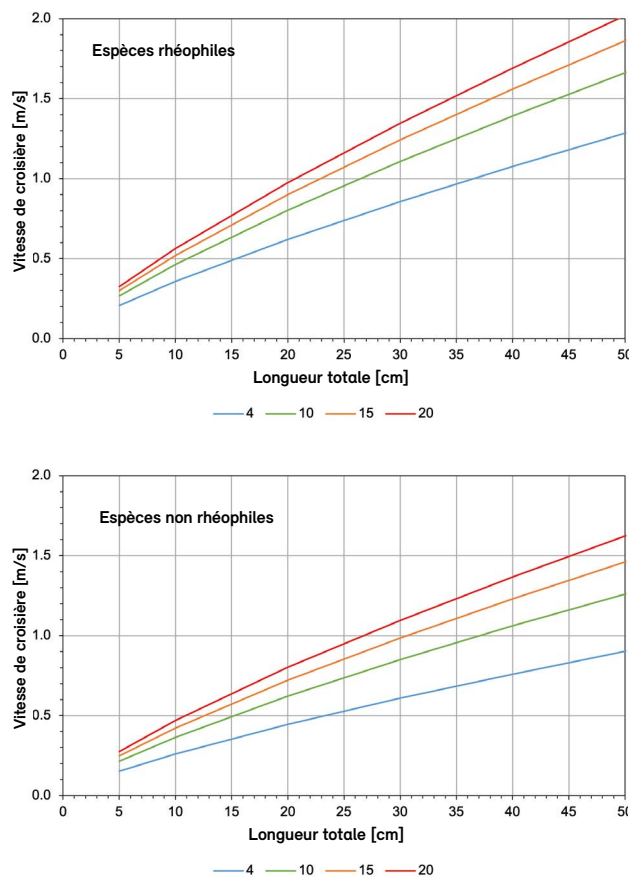
La vitesse d'incidence moyenne n'a qu'une signification biologique limitée, les vitesses variant localement, en particulier dans le cas des *grilles horizontales*. Puisque les poissons recherchent un couloir de franchissement sur toute la longueur de la grille, la vitesse d'incidence maximale locale est déterminante. Elle ne peut être calculée qu'à l'aide de procédures de modélisation complexes. À titre de valeur approximative, la vitesse moyenne calculée peut être majorée de 30 % (Turnpenny et al. 1998).

La vitesse d'incidence varie non seulement le long de la grille, mais aussi en fonction du débit. La vitesse d'incidence maximale admissible ne doit donc être dépassée ni dans l'espace ni dans le temps. Elle doit être suffisamment faible pour permettre aux poissons de rester libres de leur mouvement devant la grille.

Dans le cas de barrières purement mécaniques (p. ex. les grilles fines horizontales et verticales), le flux passe plus ou moins librement à travers la grille. Afin d'éviter que les poissons ne soient plaqués contre celle-ci, la vitesse d'incidence moyenne doit respecter une valeur limite ; celle-ci correspond actuellement à la vitesse fréquemment utilisée dans la pratique, soit 0,5 m/s. Dans les eaux où vivent des *cyprinidés* juvéniles, elle est fixée à 0,4 m/s. Les deux valeurs limites tiennent déjà compte des incertitudes dues à la distribution inégale de la vitesse en amont de la grille. Les longueurs de poissons protégés avec ces limites peuvent être estimées à partir du tableau 12 et de la figure 33. Il en ressort que si la température de l'eau baisse, les performances natatoires des poissons diminuent et donc que le risque de plaquage contre la grille augmente.

Fig. 33 : Vitesse des poissons en fonction de leur longueur et de la température de l'eau entre 4 et 20 °C, mesurée sur une période de 200 minutes

Les traitillés indiquent les vitesses d'incidence maximales de 0,5 m/s et 0,4 m/s (uniquement pour les juvéniles des espèces non rhéophiles ; calcul selon Ebel 2014).



Si, en raison de conditions locales ou opérationnelles, ces limites ne peuvent pas être respectées, il convient d'indiquer les espèces et les longueurs de corps qui sont concernées. Selon la valeur attendue de la mortalité due aux turbines, il y a lieu d'envisager un espacement accru des barres afin d'éviter que les poissons ne se blessent à la grille.

En ce qui concerne les barrières comportementales mécaniques, comme les bar racks, la question du plaquage contre la grille ne se pose généralement pas, l'espacement des barres étant suffisant et le courant sur la grille étant dévié en direction du *by-pass*. Par conséquent, la vitesse d'incidence n'est pas un paramètre pertinent, et

seule sa composante normale importe, pour laquelle les valeurs limites de 0,5 et 0,4 m/s s'appliquent également.

5.1.1.3 Effet de guidage

Les poissons dévalent avec le courant principal. En conséquence, ils peuvent facilement trouver les voies de passage par les vannes et à travers la turbine, à condition que suffisamment d'eau y circule. Un *by-pass*, en revanche, ne peut être trouvé qu'à l'aide d'une barrière avec une fonction de guidage. Les poissons détectent sensoriellement (de manière optique ou tactile [balayage avec la nageoire caudale] ou encore au moyen des neuromastes sensibles à la pression localisés dans la ligne latérale) la barrière en tant qu'obstacle physique et se meuvent le long de la grille vers le *by-pass*.

Sur une *grille verticale* droite, la recherche d'un passage est non orientée. C'est donc le hasard qui guide les poissons vers un couloir de dévalaison (Schwevers & Adam 2020, p. 173 ss). Si la vitesse d'incidence maximale est supérieure à la vitesse de croisière du poisson, la durée de la recherche est limitée.

Sur une *grille verticale* inclinée (angle d'inclinaison < 45°), le guidage oriente les poissons vers le bord supérieur de la grille (Schwevers & Adam 2020, p. 177 ss), où ils sont ensuite acheminés vers le *bief aval* via une gouttière ou un orifice latéral. Cependant, les poissons ne migrant pas à proximité de la surface de l'eau sont ainsi obligés de quitter leur zone de nage habituelle. L'effet de guidage est spécifique à chaque espèce. Il est d'autant meilleur que le poisson est long, que l'angle d'inclinaison est petit et que l'espacement des barres est faible (Cuchet et al. 2018). L'effet de guidage est beaucoup moins prononcé qu'avec une *grille horizontale*, du moins pour les petits poissons (Cuchet et al. 2018). Une *grille verticale* inclinée ne doit donc être utilisée que dans des situations particulières, par exemple lorsque l'espace est limité latéralement ou lorsque la profondeur d'eau est très faible dans le *bief amont*. Si, pour des raisons structurelles, seule une fonction de protection est possible, une *grille verticale* conventionnelle peut être construite avec un faible espacement entre les barres.

Une *grille horizontale* provoque un effet de guidage vers l'extrémité aval de la grille. Les poissons peuvent rester

dans la tranche d'eau qui leur convient et entrer dans un *by-pass* aménagé latéralement. Une *grille horizontale* n'est donc pas seulement une barrière de protection, mais aussi une structure de guidage. Pour cette raison, on parle souvent de systèmes « grille de guidage – *by-pass* » (Ebel 2018, Ebel et al. 2017). Un tel système est actuellement considéré comme la solution idéale (« best practice ») pour les ouvrages de dévalaison sur les petits et moyens cours d'eau⁷. Il convient de tester son application au moins jusqu'à un débit d'équipement de 100 m³/s et, si elle représente la meilleure variante, de la mettre en œuvre.

L'effet de guidage souhaité n'est obtenu que si les conditions hydrodynamiques dans la zone en amont de la grille génèrent un courant incident à peu près homogène. C'est le cas, par exemple, lorsque le canal d'amenée est rectiligne. Si le courant incident n'est pas uniforme – par exemple en raison de l'existence de composants de l'installation à proximité (vanne, canal de purge, *by-pass*) – l'effet de guidage fait défaut aux endroits où le courant arrive perpendiculairement sur la grille. Toutefois, la fonction de guidage n'est efficace que s'il existe un *by-pass* facilement repérable, correctement dimensionné et suffisamment doté (point 5.1.2). Sinon, il faut s'attendre à un nombre accru de poissons passant par la grille (Mueller et al. 2020).

Le nettoyage des grilles provoque des perturbations hydrodynamiques et peut donc entraîner une réaction de fuite chez les poissons. Comme le but est d'éviter que les poissons se blessent lors de telles opérations, il y a lieu de concevoir des grilles pouvant être exploitées en permanence et nécessitant une fréquence de nettoyage la plus faible possible (Ebel et al. 2018).

⁷ De nombreuses prises d'eau servent à d'autres fins que l'utilisation hydroélectrique (p. ex. eau de refroidissement, eau de service, irrigation). Pour ces captages, une protection efficace des poissons est également souhaitable, mais peut être réalisée avec des dispositifs plus simples.

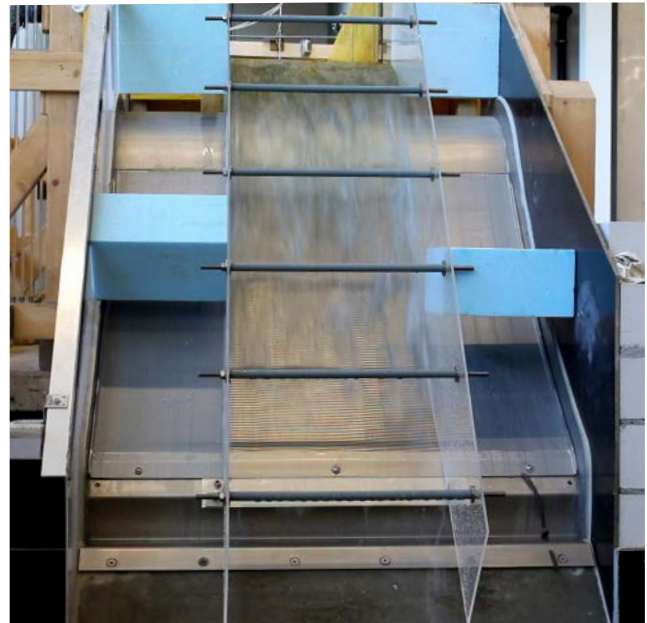
5.1.1.4 Cas particulier de l'anguille

Lors d'expériences de laboratoire (Meister 2020), il a été observé que les anguilles nagent vers l'aval par rhéotaxie négative et entrent en collision avec la grille, puis tentent de se passer à travers les barres. Au cours de ce processus, les anguilles touchent plusieurs fois la grille (thigmotaxie). Seuls quelques individus se sont approchés de la grille par une rhéotaxie positive. Le comportement des anguilles en situation naturelle reste cependant mal connu. Il existe des résultats contradictoires concernant la repérabilité des *by-pass* localisés au niveau des grilles positionnées de manière oblique par rapport au courant (Ebel 2017 et 2018, Egg et al. 2017, Lehmann et al. 2016). Mueller et al. (2020) ont montré l'importance de l'existence de *couloir de migration* pour les anguilles. Ils ont constaté que les anguilles se déplaçaient devant la *grille horizontale* lorsque la vanne de purge était fermée, probablement à la recherche d'autres couloirs de migration vers aval. La nuit, elles migraient principalement par la vanne de purge ouverte et évitaient les passes à anguilles, qui ont tendance à s'engorger facilement et n'étaient donc que rarement utilisées. À la centrale d'Unkelmühle, il a été observé que les anguilles, après avoir longé la *grille verticale* inclinée, préféraient migrer au moyen des *by-pass* proches de la surface plutôt que via les passes à anguilles installées sur le côté ou la bottom gallery aménagée le long du fond (Bezirksregierung Köln 2019). La protection a pu être augmentée expérimentalement grâce à des champs électriques faibles, générés directement derrière le plan de la grille (Berger 2017). De tels systèmes pourraient être utilisés avec succès pour la dévalaison des anguilles, notamment dans les centrales hydrauliques où un faible espacement entre les barres n'est pas envisageable pour des raisons opérationnelles. Cependant, pour toutes les autres espèces de poissons se déplaçant à proximité de la grille en direction du *by-pass*, l'électrification pourrait entraîner un effet répulsif indésirable.

5.1.1.5 Autres barrières mécaniques

Un effet de guidage des poissons peut non seulement être obtenu avec des *grilles horizontales* disposées en oblique par rapport au courant, mais aussi avec d'autres barrières mécaniques comportementales, à condition qu'elles soient exposées de manière oblique par rapport au flux incident. Pour les poissons migrant près de la surface (en particulier les juvéniles), une possibilité consiste à les guider

Fig. 34 : Flux passant sur une grille Coanda en laboratoire



Source : L. Wilmsmeier

vers la vanne ou vers un ouvrage de dévalaison au moyen d'une paroi plongeante. Pour les poissons migrant près du fond, le guidage peut être effectué au moyen d'un sillon aménagé sur le fond. La combinaison d'une paroi plongeante et d'un sillon aménagé sur le fond avec une grille peut être bénéfique. Ces types de sillons sont d'ailleurs souvent utilisés en combinaison avec des *grilles horizontales*. Les louvers et les bar racks présentent un potentiel pour les grands cours d'eau. Il s'agit de grilles disposées horizontalement et de manière oblique par rapport à la direction du courant, équipées de barres verticales (point 5.3.4). En Suisse, ce type de grille n'a toutefois été utilisé jusqu'à présent que dans des ouvrages expérimentaux (point 5.3.4). Les parois plongeantes, les sillons aménagés sur le fond, les louvers et les bar racks sont généralement appelés barrières comportementales mécaniques (tab. 11).

La grille Coanda est un type de grille particulier, conçu pour les captages dans les cours d'eau à fort charriage (point 5.3.5 ; fig. 34).

Grâce au très faible espacement et à la forme spéciale des barres, les poissons glissent sur un film d'eau par-dessus la grille jusqu'au *bief aval*. L'absence de guidage au niveau de la surface et la profondeur d'eau généralement

très faible au niveau du déversoir au-dessus de la grille constituent cependant des inconvénients.

En laboratoire, des tests éthohydrauliques ont été réalisés sur des truites de rivière dévalant par une grille Coanda à des largeurs de fente de 0,6 mm et 1 mm. Aucune blessure significative n'a été observée dans les deux classes de taille de truites utilisées (Haute école spécialisée des Grisons, en préparation). Seules des pertes d'écaillés ont été observées, pour maximum de 1 % de la surface corporelle mais en moyenne nettement moins. Aucun autre type de blessures n'a été constaté. Il est important de noter que ces tests font référence au passage au-dessus d'une grille fine, dont l'accès n'est pas protégé par une grille fixe.

5.1.1.6 Barrières comportementales sensorielles

Le principe de fonctionnement des barrières comportementales, qui contrairement aux barrières mécaniques sont toujours perméables aux poissons, repose sur la génération de stimuli sensoriels (Coutant 2001) incitant les poissons à éviter certaines zones et les guidant vers des zones de migration sans danger (*by-pass*). Coutant (2001) énumère les types suivants (combinaisons possibles).

- **Lumière** (p. ex. stroboscope, lampe à vapeur de mercure) : de nombreuses espèces de poissons disposent de bonnes capacités visuelles. La lumière peut exercer des effets spécifiques aux espèces (dissuasion ou attrait), mais ils sont fortement réduits en cas de turbidité. Exemple : dans les eaux néerlandaises, des lampes stroboscopiques sont utilisées pour dissuader les anguilles.
- **Son** (sons/bruits de différentes fréquences, intensités et durées) : effets répulsifs prononcés pour les fréquences très basses (< 20 Hz) ou les hautes fréquences (> 120 kHz). Les hautes fréquences sont souvent utilisées au niveau des prises d'eau de refroidissement. Les turbines génèrent généralement un niveau sonore élevé, ce qui nuit souvent à l'effet des barrières acoustiques. En outre, les conditions hydrodynamiques peuvent dominer l'effet du son.
- **Flux induit** (champs d'écoulement générés) : les poissons peuvent être dirigés vers les *by-pass* au moyen de champs d'écoulement induits.
- **Champs électriques** : les champs électriques peuvent être utilisés pour empêcher les poissons de pénétrer dans certaines zones (p. ex. la zone d'entrée des

turbines). Leur effet repose sur la réaction des poissons aux champs électriques, qui peuvent être générés dans l'eau au moyen d'électrodes. Cependant, leur efficacité varie en fonction de l'espèce et de la taille des poissons, de la qualité locale de l'eau et donc de la conductivité, de l'emplacement et de la nature des électrodes, du type de tension électrique et de la direction du flux par rapport à l'angle d'approche du poisson (divers auteurs, cités dans Kriewitz et al. 2012). La gamme d'efficacité observée est donc très large. Toutefois, les dispositifs de répulsion n'exercent souvent pas l'effet souhaité. Berger (2017) a utilisé l'électricité en combinaison avec l'effet de guidage des grilles horizontales et a montré que des grilles faiblement électrifiées (tension : 34 à 35 volts), avec un espacement des barres de 30 mm, exerçaient un effet protecteur élevé (> 98 %) sur l'anguille commune. Le « Fish Protector » (grille à câbles électrifiée, voir point 5.3.2), qui a été développé à l'Université d'Innsbruck, est un autre exemple de combinaison entre barrière physique et électrique. En général, les systèmes électriques fonctionnent mieux dans les petits cours d'eau. De plus, ils sont sélectifs en termes de taille et d'espèces. Par conséquent, il existe encore un besoin considérable de recherche en matière d'électrification des grilles horizontales pour une application en toute sécurité. Finalement, la compatibilité avec d'autres aspects sécuritaires doit être clarifiée afin d'exclure tout danger pour les plaisanciers et les baigneurs. En ce qui concerne l'utilisation de l'électricité dans ce contexte, on manque largement de retours d'expérience ; dans les années à venir, des investigations supplémentaires seront nécessaires.

- **Bulles** : utilisation de diffuseurs installés sur le lit du cours d'eau pour créer un rideau de bulles, souvent en combinaison avec de la lumière et/ou du son. Ce système a été utilisé avec succès pour le saumon atlantique dans des petits cours d'eau. Pour les grandes centrales hydrauliques, aucun succès n'a encore été démontré.

En raison de leur efficacité biologique limitée, les barrières comportementales sensorielles ne sont généralement utilisées qu'en complément à des barrières mécaniques existantes. En effet, comme dispositif unique de protection et de guidage des poissons, ils ne sont pas suffisamment efficaces. Cependant, la combinaison de l'électricité avec des *grilles horizontales* semble particulièrement

prometteuse. Elle nécessite toutefois des études supplémentaires avec des *cyprinidés* et d'autres espèces.

5.1.2 Dévalaison par un by-pass

Les *by-pass* sont conçus pour guider les poissons le plus rapidement possible et sans aucune blessure, en évitant la zone de danger, vers le *bief aval*. Dans le cas d'une *grille verticale* inclinée, les poissons sont acheminés vers celui-ci au moyen d'un canal collecteur proche de la surface ou d'un *by-pass* aménagé latéralement. Ce dernier cas est également possible avec une *grille horizontale* (fig. 35 ; point 5.3.7).

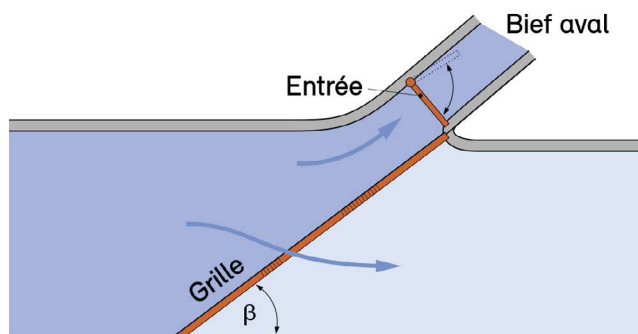
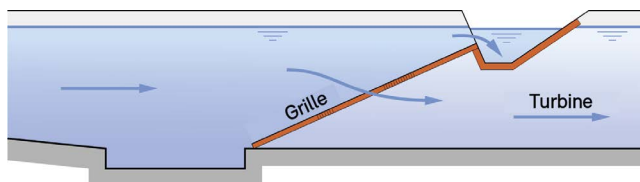
L'efficacité d'un *by-pass* dépend principalement de l'emplacement des *entrées* et des dimensions du **profil d'entrée** (Klopries et al. 2018 ; Mueller et al. 2020). Le rayon de recherche du poisson en dévalaison étant limité localement, l'*entrée* doit être située aussi près que possible de la grille, qui devrait être conçue pour servir également de

structure de guidage. Idéalement, l'*entrée* du *by-pass* devrait être disposée parallèlement au flux d'approche de la grille afin que la migration vers l'aval puisse se poursuivre sans réalignement du corps. D'après les connaissances actuelles, il semble que les *entrées* de *by-pass* non parallèles (fig. 35, à gauche) soient moins efficaces (Schwevers & Adam 2020, p. 186 et 187).

Les turbulences se formant non seulement près de l'*entrée* mais également devant la grille constituent un point crucial. Selon des simulations numériques réalisées par VAW en 2020, d'importantes turbulences peuvent se former, par exemple en raison d'une dépression dans le mur ou d'un sillon de purge en amont de la grille (VAW 2012). Les effets qu'ils ont sur le comportement des poissons restent actuellement largement inconnus. Cependant, les spécialistes s'accordent à dire qu'il faudrait les éviter autant que possible (Schwevers & Adam 2020, p. 190 ss).

Fig. 35 : Dévalaison par un by-pass

À gauche, canal collecteur et *by-pass* dans le cas d'une grille verticale inclinée sur l'Elz (Allemagne, coupe longitudinale et photo) ; à droite, vue en plan d'un *by-pass* avec grille horizontale et photo de la centrale de Rüchlig sur l'Aare (canton d'Argovie, plan et photo).



Le profil d'entrée du *by-pass* devrait comporter plusieurs entrées réparties sur la colonne d'eau (près de la surface, à mi-hauteur et près du fond) ou alors une seule fente sur toute la colonne d'eau (Mueller et al. 2020). Cette dernière solution serait à privilégier pour que les poissons n'aient pas à quitter leur position spécifique dans la colonne d'eau (Wagner 2017), mais elle entraîne un débit considérable dans le *by-pass*. Si seule une entrée près de la surface est possible, les poissons migrant près du fond peuvent en principe être guidés le long d'un sillon aménagé sur le lit jusqu'à une rampe les guidant vers l'entrée du *by-pass*. À ce jour, la conception optimale de ce type de rampe en termes de pente et de structure n'a pas encore été déterminée précisément, ni si un tel arrangement est biologiquement viable.

À l'entrée du *by-pass*, en amont de l'orifice d'entrée, la vitesse moyenne d'écoulement doit être comprise entre 1,0 et 1,5 fois la vitesse d'incidence. Dans une zone à truites, des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 2 fois la vitesse d'incidence sont acceptables. Le débit dans le *by-pass* peut être régulé au moyen d'un déversoir en forme de rampe (30° maximum) situé en aval de l'orifice d'entrée et s'élevant dans le sens du courant (fig. 51). La hauteur du barrage est réglée de manière à ce que les vitesses d'écoulement dans l'orifice d'entrée soient supérieures à la vitesse de sprint des poissons (point 3.1.2), mais au maximum égale à 3 m/s. Ainsi, après avoir franchi l'orifice d'entrée, les poissons ne peuvent plus retourner dans le *bief amont* ; en même temps, le risque de blessure dû à des vitesses d'écoulement excessives est réduit au minimum. Après l'entrée, le débit est à nouveau accéléré au niveau de la surverse, si bien que la chute du barrage représente une barrière hydraulique supplémentaire empêchant les poissons de repartir en direction du *bief amont*.

La largeur et la profondeur d'eau minimales du **profil du by-pass** dépendent des proportions corporelles des poissons cibles. Pour garantir un passage sans blessure, le fond et les parois doivent être absolument lisses. La vitesse d'écoulement dans un *by-pass* rectiligne à faible turbulence ne doit pas dépasser 4,5 m/s (max. 7 m/s dans la chute des ouvrages de régulation). Sinon, elle doit être inférieure à la vitesse de sprint des poissons les plus lents.

La **dotation** d'un *by-pass* dépend de la barrière qui lui est associée et du débit de la centrale hydraulique. Dans le cas d'un système grille-*by-pass* dimensionné de manière optimale, la dotation minimale résulte uniquement du dimensionnement du *by-pass*. Dans le cas des barrières horizontales orientées de manière oblique par rapport au courant, la dotation est égale à au moins 2 % du débit d'équipement de la centrale hydraulique ; dans les autres cas, elle doit être égale à 5 % au minimum. La dotation devrait être au moins égale à 100 l/s, même pour les petites centrales.

Les restrictions spatiales peuvent nécessiter de **couder** fortement le *by-pass*, ce qui augmente le risque de blessure. Plus l'angle d'ouverture est petit, plus le risque de collision est élevé. En outre, le risque de formation de tonneaux ou de rouleaux augmente. Si « retournement » il y a, le poisson désorienté est projeté contre le mur, ce qui peut entraîner des blessures et une mortalité élevée⁸. Le taux d'impact dépend du rayon du coude et de la vitesse d'écoulement : plus celle-ci est faible, plus le rayon du coude peut être petit (point 5.3.7).

Dans l'idéal, les eaux du *by-pass* sont déversées dans le **bief aval** en chute libre, via un toboggan ou par le fond (point 5.3.7). Une embouchure dans un ouvrage de montaison est généralement défavorable en raison de l'apport d'énergie et de la dérivation de corps flottants (point 4.1.2). Dans la zone de l'embouchure, il faut tenir compte de la protection contre les prédateurs et du remblayage avec du charriage. En outre, lors de la purge du *by-pass*, il convient de veiller, surtout dans le cas de petites installations, à ce qu'il ne se produise pas d'augmentation abrupte de débit nuisible aux organismes aquatiques présents dans le *bief aval*.

Le flux sortant du *by-pass* ne doit pas entrer en concurrence avec le *courant d'attrait* provenant de l'ouvrage de montaison. Idéalement, il peut en améliorer la réparabilité dans le sens d'une *dotation supplémentaire*. Sinon, il doit s'écouler aussi loin que possible en aval de l'entrée de l'ouvrage de montaison.

⁸ Des preuves correspondantes de dommages sont connues en Suisse pour les centrales hydrauliques sur la Limmat (Zaugg & Mendez 2018) et sur la Thur.

5.1.3 Dévalaison par les turbines

5.1.3.1 Le passage dans les turbines comme couloir de migration

Les sources de lésions possibles subies par les poissons au niveau des différentes parties de la turbine sont résumées dans la figure 36.

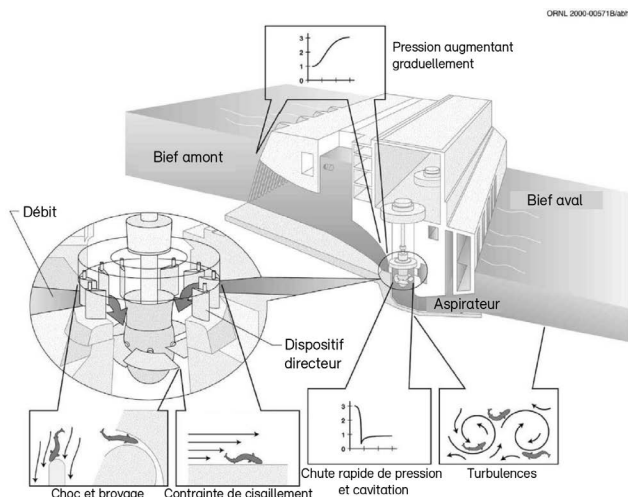
Les turbines actuelles causent certes moins de mortalité et de blessures que les turbines utilisées par le passé, mais nous sommes encore loin de la turbine « ichtyophile ». C'est pourquoi nous utilisons l'expression « turbine adaptée aux poissons ». En termes de blessures et de mortalité, les turbines sont simplement plus ou moins loin d'être idéales.

Lors du passage des turbines, les gros poissons sont principalement confrontés au problème des dommages causés par les contacts à différents niveaux de celles-ci (fig. 37). En revanche, pour les petits poissons, qui passent plus facilement à travers les turbines en raison de leur taille, la chute rapide de pression sur le côté aval du rotor est le facteur de dommage décisif. Dans l'état actuel des connaissances, la solution la plus prometteuse consiste à modifier les turbines Kaplan afin de réduire l'effet délétère sur les poissons pendant le passage (p. ex. vertical minimal gap runner de Voith [fig. 38]). Dans le cas

des petites centrales hydrauliques, les turbines VLH ainsi que la vis d'Archimède sans arête d'usure sont souvent décrites comme beaucoup plus adaptées aux poissons que les turbines conventionnelles (Francis, Pelton ou Ossberger). Cependant, des études approfondies menées à l'Université technique de Munich (TUM 2020) ont montré que même les turbines VLH ou les vis d'Archimède ne peuvent être classées comme fondamentalement inoffensives pour les poissons, car elles peuvent entraîner une mortalité considérable lors de la dévalaison. Les investigations ont généralement montré qu'il existait, pour une technologie donnée, de fortes différences selon les sites et les espèces. C'est pourquoi il convient d'accorder, dans les planifications futures, plus d'importance aux caractéristiques spécifiques du site qu'à une technologie particulière.

Les spécialistes s'accordent à dire que la mortalité autorisée sur un site donné devrait d'abord être déterminée sur la base d'études approfondies. Dans ce contexte, il est important de prendre en compte, en plus du degré de mise en danger des espèces respectives, les effets cumulatifs des diverses centrales successives afin d'atteindre le taux de survie global visé pour un réseau hydrographique donné. Le taux de mortalité spécifique au site est dérivé des résultats de calculs prévisionnels ou d'études biologiques de terrain, dans lesquels la fréquence d'utilisation des couloirs respectifs et les taux de mortalité qui en découlent sont pris en compte.

Fig. 36 : Sources de lésions possibles subies par les poissons au niveau des différentes parties de la turbine



D'après Cada 2001, mod.

Fig. 37 : Anguilles tuées lors du passage de la turbine Centrale de Rheinau sur le haut Rhin (canton de Zurich).



Source : T. Polli

Dans les **grandes installations** (> 100 m³/s de débit d'équipement), la dévalaison n'est actuellement possible en Suisse que via la turbine. En principe, plus une turbine tourne lentement, plus la mortalité des poissons liée au passage est faible. Cependant, dans des conditions de débit variables (hautes eaux et basses eaux), la commande des turbines constitue un défi (point 4.1.6). Les valeurs acceptables de mortalité due aux turbines, discutées par Kirchhofer & Hässig (2016) dans le cas des grands cours d'eau (> 50 m³/s de débit turbiné ainsi que < 20 m de hauteur de chute), devraient au moins être fixées, compte tenu des développements actuels, pour des débits supérieurs à 100 m³/s. Cela signifie que les passages à travers la turbine peuvent être empêchés par des barrières physiques (grilles fines) jusqu'à un débit équipé de 100 m³/s.

Différents **modèles de pronostic** sont disponibles pour l'estimation quantitative du taux de mortalité à prévoir dans une turbine donnée. Les explications données par Ebel (2008 et 2018) fournissent un aperçu des équations de modèle disponibles, des aspects méthodologiques de l'application du modèle et de la précision respective des résultats du modèle. Il ressort de ces articles que la mortalité attendue peut actuellement être prédite avec une grande fiabilité, en particulier pour les anguilles. Les modèles

de prédiction spécifiques à l'anguille ont un pouvoir explicatif extraordinairement élevé ($R^2 \geq 0,87$) par rapport aux taux de mortalité réellement détectés sur le terrain et sont également très significatifs ($p < 0,00001$). Cependant, les modèles de prédiction ne tiennent pas compte de la disposition des pales du dispositif directeur.

La question de la prédiction de la mortalité liée aux turbines par application d'équations modèles est certes déjà très avancée, mais les études de terrain restent, malgré tout, d'une grande importance et devraient être poursuivies. En la matière, les objectifs suivants semblent particulièrement importants : évaluation des taux de mortalité dans les nouveaux types de turbines et amélioration de la base de données tant pour les espèces *potamodromes* que pour les très petits individus.

S'agissant des turbines, les nouvelles technologies suivantes présentent un potentiel d'amélioration en ce qui concerne la dévalaison des poissons (Hogan et al. 2014).

- **Minimum Gap Runner (MGR)** : le MGR (fig. 38) est une évolution de la turbine Kaplan avec un arbre et un stator sphériques, ce qui réduit les entrefers. Il présente en outre un écoulement uniforme.
- **Turbine Alden** : la turbine Alden (fig. 39), nettement plus large que la turbine Kaplan, comporte trois pales en spirale. Elle ne peut être utilisée que verticalement et ne peut généralement pas être intégrée dans des installations existantes en raison du diamètre relativement important du rotor. Elle fonctionne à une vitesse relativement faible et ne présente pas d'entrefer. Elle ne convient que pour un débit inférieur ou égal à 65 m³/s.
- **Turbines « basse chute »** (turbine LH ou « low head », hauteur de chute de 20 m ou moins ; fig. 40) : système Pentair Fairbanks Nijhuis. Caractéristiques générales : utilisé avec des hauteurs de chute < 6 m, petit nombre de pales (2 ou 3), bords fortement arrondis et grands espaces entre les pales, vitesse 60 à 90 tr/min. Le risque de blessure pour les poissons est généralement faible ; le taux de survie des petites anguilles (anguilles jaunes d'une longueur moyenne de 20 à 25 cm) est de 100 % selon les études menées sur un prototype.
- **Turbines « très basse chute »** (turbine VLH ou « very low head », hauteur de chute de 1 à 4,5 m ; fig. 41) : les turbines VLH ont un grand diamètre (3,5 à 5,5 m) et de

Fig. 38 : Minimum Gap Runner



grands espaces entre les pales. La vitesse de rotation est de 10 à 40 tr/min, la variation de pression est faible. Dans la littérature, il existe différentes données sur le taux de mortalité (de valeurs très faibles à des valeurs importantes, p. ex. 7,7 % pour l'anguille à la centrale de Millau, en France). Cooke et al. (2011) estiment qu'à ce jour l'évaluation des turbines VLH n'a été réalisée que dans une mesure très limitée et avec des études très restreintes. Dans les études de la TUM (2020), une mortalité variable, en lien avec la dévalaison, a été observée pour toute la faune piscicole : des valeurs faibles (2 à 6 %) sur le site d'Au an der Iller, des valeurs élevées (15 à 19 %) sur le site de Baierbrunn, Isar. Ce dernier est caractérisé par une hauteur de chute relativement élevée (de 4 m) et une vitesse de rotation élevée de la turbine (56 tr/min). Manifestement, la même technologie peut entraîner des niveaux de dommages très différents en fonction du site.

- **Vis hydrodynamique** (vis d'Archimède, fig. 42 ; point 5.3.8) : en ce qui concerne les vis hydrodynamiques, il est fréquemment mentionné qu'aucune mortalité ou blessure n'est observée durant la dévalaison. En Allemagne, cependant, des problèmes liés à la dévalaison sont connus pour diverses espèces. En principe, les quelques études menées jusqu'à présent (Späh 2001, Schmalz 2010) ont montré que le risque de blessure dépend fortement de l'état de maintenance de la vis hydrodynamique, des fentes se formant après une utilisation prolongée, ce qui présente un danger pour les poissons. Les types et les fréquences de blessures sont fortement spécifiques aux espèces. Il ressort des études bibliographiques (Seidel et al. 2017) qu'il existe encore des incertitudes concernant le caractère adapté aux poissons des vis hydrodynamiques et que les résultats de suivi sont trop peu nombreux. Wagner et al. (2017) confirment que de faibles taux de blessures ne peuvent être prédits de manière robuste que pour le saumon et l'anguille.

Des études récentes (TUM 2020) montrent que les résultats varient selon le site et les espèces de poissons. Alors que la vis hydrodynamique étudiée sur le site de Baiersdorf-Wellenstadt sur la Regnitz a présenté de faibles taux de mortalité liés à la dévalaison de l'anguille (< 3 %), des valeurs significativement plus élevées, d'environ 20 %, ont été observées pour le gardon sur le site de Heckerwehr sur la Roth. Sur ce dernier site, le

taux de mortalité des poissons était de 4 à 13 % toutes espèces confondues.

S'agissant de la vis hydrodynamique utilisée en montagne (Hydro-Connect, point 5.3.8), il est souligné qu'elle sert également à la dévalaison. Malgré l'expérience limitée, il est démontré que ce système est adapté aux poissons.

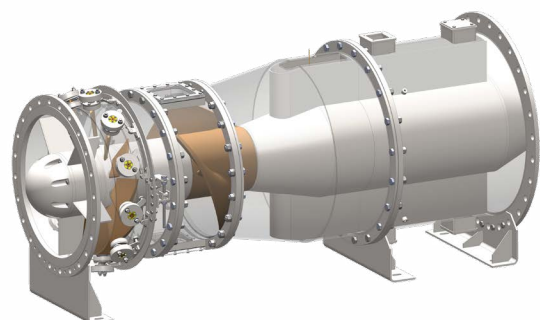
On sait encore trop peu de choses au sujet de l'acceptation et de la réparabilité des entrées de vis proches de la surface (Ratschan et al. 2017). Les études sur un éventuel effet répulsif sur les poissons font défaut.

Fig. 39 : Turbine Alden



Source : Hogan et al. 2014

Fig. 40 : Turbine « low head » (Pentair Fairbanks Nijuis7M Fish Friendly Turbine)



Source : van Esch 2015

Fig. 41 : Turbine « very low head »



Source : MJ2 Technologies S.A.S., www.vlh-turbine.com

Fig. 42 : Vis hydrodynamique à centrale de Lengnau sur la Surb



Source : A. Peter

Fig. 43 : Bassin d'amortissement

À gauche, barrage sans bassin d'amortissement à la centrale hydraulique de Blumer sur la Linth (canton de Glaris) ;

à droite, barrage avec un bassin d'amortissement suffisamment grand à la centrale hydraulique Seidendruckerei sur la Linth (canton de Glaris).



Source : W. Dönni

5.1.3.2 Exigences posées aux turbines adaptées aux poissons

Les exigences techniques posées aux turbines adaptées aux poissons sont les suivantes : grand diamètre, petit nombre de pales, distances importantes entre les pales, vitesse de rotation lente, pression minimale la plus élevée possible (NADIR).

Les exigences biologiques concernent le taux de survie et de blessure. Le taux de survie doit être aussi élevé que possible (> 95 %), selon l'espèce de poisson. Des taux supérieurs à 97 % ont été constatés pour les smolts de saumon (97,8 %) au passage d'une turbine (minimum gap runner) au barrage de Wanapum sur le fleuve Columbia (Hogan et al. 2014) ainsi que pour les anguilles franchissant des vis d'Archimède et des turbines VHL (Mueller et al. 2020). Le nombre de blessures doit être faible. Les blessures les plus courantes sont des déchirures des nageoires et la perte d'écaillés. Cependant, les études de la TUM ont montré que les blessures sont plutôt spécifiques au site et ne dépendent pas nécessairement de la solution technique (type de turbine).

Ces exigences sont axées sur les grands cours d'eau (Rhin, Aar, etc.). Dans les petites installations, les taux de survie susmentionnés pour le passage des turbines sont plus difficiles à atteindre (exception pour les vis hydrodynamiques, selon le site et l'espèce de poisson). Il est donc absolument nécessaire d'assurer une protection systématique des poissons et de les guider vers le *by-pass*.



5.1.4 Dévalaison par les vannes

Comme les poissons migrent avec le courant principal, les vannes ayant un débit notable constituent un important couloir vers l'aval. Le comportement des poissons devant les vannes n'a encore été guère étudié. Les connaissances sur les structures adaptées aux poissons ou sur le type optimal de vannes sont également encore limitées à l'heure actuelle. Cependant, on peut supposer que les conditions hydrodynamiques sont d'une grande importance. En conséquence, comme pour l'entrée d'un *by-pass*, il importe que la vitesse d'écoulement augmente lentement et régulièrement et que le courant soit dépourvu de turbulences si l'on veut éviter les réactions de fuite en amont (Silva et al. 2017). En outre, il faut s'attendre à des comportements spécifiques à chaque espèce.

Les connaissances sur les conditions à réunir pour assurer une dévalaison sûre par les **surverses des barrages** sont encore très lacunaires (Weichert & Thorenz 2017). Les recommandations suivantes sont fondées sur des critères simplifiés.

Il convient d'éviter d'implanter des perturbateurs de flux sur la crête du barrage si les conditions hydrodynamiques le permettent. Ils présentent en effet un risque direct de blessure pour les poissons. Ils conduisent en outre à un fractionnement de la surverse en flux individuels et

réduisent ainsi l'effet du matelas d'eau dans le *bief aval* (Weichert & Thorenz 2017).

Jusqu'à une hauteur de chute de 13 m ou une vitesse d'impact de 16 m/s, le risque de blessure est faible si le poisson tombe directement dans un bassin d'amortissement dans lequel le jet ne pénètre pas jusqu'au fond. La profondeur du bassin d'amortissement doit être au moins égale à 25 % de la hauteur de chute, avec une valeur minimale de 1,3 m. Le bassin d'amortissement doit être suffisamment grand pour permettre aux poissons d'y tomber directement et pour absorber les surverses à des débits d'au moins Q_{30} avec une *puissance volumique dissipée* maximale de 500 W/m³. En outre, il doit être exempt de corps perturbateurs (p. ex. des éléments en béton) (fig. 43). Enfin, les poissons doivent pouvoir quitter le bassin d'amortissement en direction de l'aval. Tout contre-barrage doit donc être franchissable pour les poissons.

La table de réception sous le boudin constitue un point critique des barrages gonflables, les poissons migrateurs pouvant heurter le fond après avoir franchi la surverse du barrage (fig. 44, à gauche)⁹. Les investigations menées avec des tables de réception modifiées n'ont pas abouti à des solutions convaincantes (Gebhardt et al. 2017). En revanche, l'installation d'un toboggan par-dessus la table ou un ajustement du rebord du barrage pourrait être

Fig. 44 : Barrage gonflable à surverse

À gauche, barrage gonflable avec table de réception à la centrale de Messer sur l'Aabach (canton d'Argovie) ; à droite, barrage gonflable équipé d'un avant-corps afin de prolonger le tronçon d'accélération à la centrale de Schoftland sur la Suhre (canton d'Argovie).



Source : W. Dönni (photo de gauche), T. Kropf (photo de droite)

⁹ L'importance de ce risque peut être observée sur le terrain ou calculée selon Gebhardt et al. (2017).

Fig. 45 : Vanne de barrage à sousverse

Centrale hydraulique de Rathausen sur la Reuss (canton de Lucerne).



Source : W. Dönni

avantageux afin que la surverse, et donc les poissons avec elle, tombe au-delà de la table de réception (fig. 44, à droite).

Les **barrages à sousverse** (fig. 45) présentent généralement plus de risques de blessures que les barrages à surverse avec un bassin d'amortissement suffisamment profond. Si l'eau s'écoule sous pression et à vitesse élevée en dessous du segment de vanne concerné, il existe un risque accru de blessure en raison des gradients de vitesse et des différences de pression élevés. Une vitesse d'écoulement de 4,5 m/s est considérée comme valeur limite. Les espèces particulièrement sensibles à une diminution rapide de la pression sont les poissons de type perche (p. ex. la perche fluviatile) ainsi que la lotte et l'épinoche.

5.1.5 Dévalaison par un ouvrage de montaison

En principe, les ouvrages de montaison conviennent comme couloirs de dévalaison, mais les poissons ont généralement de la peine à les trouver, en raison notamment de la distance minimale de 5 m requise par rapport à la grille (point 4.2.4). Dans le cas de centrales avec dérivation construites sur de petits cours d'eau, il peut toutefois être judicieux d'utiliser l'ouvrage de montaison pour la dévalaison si le débit résiduel est insuffisant pour la dotation d'un ouvrage de franchissement additionnel ou si la compensation pour le débit résiduel supplémentaire est disproportionnée. Bien entendu, la montaison ne doit pas être perturbée par le processus. Chaque cas nécessite une pesée d'intérêt minutieuse.

Tab. 13 : Valeurs limites pertinentes pour les ouvrages de dévalaison

	Paramètre	Valeur caractéristique	Description/Source
Grille	Orientation des barres	Verticale / horizontale	
	Espacement libre des barres	≤ 15 mm ; ≤ 20 mm si les conditions locales ou opérationnelles ne permettent manifestement pas de respecter cette valeur limite ; dans les eaux à anguilles, toujours ≤ 15 mm.	S'applique à tous les types de grilles fines
	Vitesse d'incidence	≤ 0,5 m/s ; ≤ 0,4 m/s si présence de 1+ cyprinidés	S'applique à tous les types de grilles fines
	Angle d'incidence de l'écoulement	< 45 °	Données spécifiques pour les grilles horizontales en fonction de la vitesse d'incidence, de l'espèce et de la taille des poissons dans Ebel 2018 p. 288
	Hauteur du sillon aménagé sur le fond	15 à 20 % de la profondeur d'eau ≥ 0,50 m	Ebel 2018, p. 307
	Profondeur de la paroi plongeante	30 à 50 % de la profondeur d'eau ≥ 1 m	Ebel 2018, p. 307
Entrée du by-pass	Nombre d'entrées	Une entrée par tranche de 10 à 15 m de longueur de grille	S'applique aux grilles non obliques par rapport au courant et de manière générale aux grilles présentant des caractéristiques hydrauliques ou géométriques défavorables (Ebel 2018, p. 304).
	Liaison avec le fond	Au moyen d'un sillon aménagé sur le fond et d'une ouverture proche du fond	
	Forme	Profil transversal rectangulaire avec apport de lumière	Ebel 2018, p. 254, 304, 305, 328
	Vitesse d'écoulement devant l'entrée	1 à 1,5 fois la vitesse d'incidence moyenne, mais au moins 0,30 m/s et augmentant lentement et régulièrement en direction de l'orifice d'entrée.	USBR 2006, p. IV-64 ; Ebel 2018, p. 302, Schwevers & Adam 2020, p. 191
	Vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice d'entrée	Supérieure à la vitesse de sprint des poissons cibles ; max. 3 m/s	
By-pass	Largeur libre	0,2 à 1 m	Données spécifiques en fonction des espèces et de la taille des poissons dans Ebel 2018 p. 298 ss
	Profondeur de l'eau	0,30 à 1,50 m	Données spécifiques en fonction des espèces et de la taille des poissons dans Ebel 2018 p. 298 ss
	Inclinaison de l'ouvrage de régulation (rampe)	10 à 30 °	Ebel 2018, p. 321
	Vitesse d'écoulement dans la surverse d'ouvrages de régulation	≤ 7 m/s	Ebel 2018, p. 303
	Vitesse d'écoulement de fond dans les ouvrages de régulation à sousverse	≤ 3 m/s	USBR 2006, p. IV-66
	Dotation minimale du système grille-by-pass dans des conditions optimales	Résulte du dimensionnement du by-pass, mais ≥ 100 l/s	Ebel 2018, p. 305 LUBW 2016, p. 28
	Dotation minimale du système grille-by-pass dans des conditions défavorables	Grille orientée de manière oblique par rapport au courant incident : ≥ 2 % du débit moyen d'exploitation Grille non orientée de manière oblique par rapport au courant incident : ≥ 5 % du débit moyen d'exploitation	P. ex. en cas de vitesses d'incidence inadaptées au niveau de la grille ou en cas de disposition défavorable de l'entrée du by-pass par rapport à la grille (Ebel 2018, p. 305).
	Rayon du coude	≥ 3,0 m ou ≥ 5 x la largeur du by-pass.	Ebel 2018, p. 301

	Paramètre	Valeur caractéristique	Description/Source
Sortie du by-pass	Hauteur de chute ou vitesse au moment de l'impact avec la surface de l'eau	$\leq 2,5$ ou ≤ 7 m/s	Ebel 2018, p. 303
	Profondeur d'eau dans le bassin d'amortissement	$\geq 1,3$ m	Ebel 2018, p. 302
	Densité de puissance dans le bassin d'amortissement	≤ 500 W/m ³	Ebel 2018, p. 302
	Vitesse de sortie en cas de liaison avec le fond	$\leq 4,5$ m/s	Ebel 2018, p. 303 et 307
Barrage	Hauteur de chute ou vitesse au moment de l'impact dans le cas des barrages à surverse	≤ 13 m resp. ≤ 16 m/s	Ebel 2018, p. 121, Larinier & Travade 2002
	Profondeur d'eau dans le bassin d'amortissement	≥ 25 % de la hauteur de chute, mais $\geq 1,3$ m	Ebel 2018, p. 302, USFWS 2019, p. 9-5
	Puissance volumique dissipée dans le bassin d'amortissement	≤ 500 W/m ³	Ebel 2018, p. 302
	Vitesse d'écoulement de fond dans les barrages à sousverse	$\leq 4,5$ m/s	Ebel 2018, p. 303 et 307

5.2 Paramètres et leurs valeurs limites pour la dévalaison

S'agissant des ouvrages de dévalaison, les valeurs limites indiquées dans le tableau 13 doivent évidemment être respectées pour garantir leur réparabilité et leur franchissabilité. Pour tenir compte des incertitudes liées au calcul hydraulique, aux travaux de construction et aux influences opérationnelles possibles (p. ex. les débris flottants), il peut être nécessaire de prévoir des valeurs de dimensionnement légèrement inférieures ou légèrement supérieures.

5.3 Mise en œuvre technique

5.3.1 Grille horizontale

L'alignement horizontal des barres de la grille constitue la caractéristique principale de ce système. Les *grilles horizontales* sont souvent utilisées comme grilles de guidage ; ce sont des barrières positionnées de manière oblique par rapport à la direction du flux incident (angle d'incidence : $\beta < 45^\circ$) (point 5.1.1.1, fig. 46). Dans ce cas, les débris accumulés sur la grille sont généralement évacués horizontalement par un dégrilleur en direction d'une gouttière rectangulaire située à l'extrémité aval de la grille, qui sert également de *by-pass* pour la dévalaison (système « grille

de guidage – *by-pass* » selon Ebel, Gluch & Kehl ; Ebel et al. 2017, Ebel 2018, point 5.3.7). Afin d'améliorer le guidage et de réduire l'entretien, les *grilles horizontales* sont souvent combinées avec des sillons aménagés sur le fond et des parois plongeantes.

Les *grilles horizontales* avec fonction de guidage sont généralement conçues comme des grilles fines, c'est

Fig. 46 : Grille horizontale en construction
Centrale de Dietikon sur la Limmat (canton de Zurich).



Source : C. Beck

pourquoi leur utilisation est limitée aux petites et moyennes centrales au fil de l'eau. La question de l'utilisation d'une grille horizontale se pose jusqu'à un débit d'équipement de 100 m³/s. Selon Ebel et al. (2018), un espacement des barres de 10 mm peut être mis en œuvre avec des débits allant jusqu'à 50 m³/s. Selon Dumont (2011), l'utilisation de grilles fines avec un espacement des barres de 10 à 15 mm n'est plus possible dans les installations dont le débit d'équipement est nettement supérieur à 100 m³/s. Cette limitation est principalement due au fait que la taille de la grille augmente également avec la taille de la centrale, et que son nettoyage devient problématique pour les grandes centrales (Kriewitz et al. 2012).

Les paramètres de dimensionnement des grilles horizontales les plus importants sont l'espacement libre des barres, l'angle et la vitesse d'incidence, la hauteur du sillon aménagé sur le fond et la profondeur d'immersion de la paroi plongeante. Les valeurs de dimensionnement et d'orientation figurent dans le tableau 13.

Appréciation : la grille horizontale est la grille de guidage la plus utilisée de nos jours pour les petites et moyennes centrales hydrauliques. Lorsque le courant incident est homogène, elle crée un bon effet de guidage (point 5.1.1). Cependant, l'espace requis est important en raison de l'orientation de manière oblique et du fait que la vitesse d'incidence admissible est relativement faible. La mise en œuvre dans les centrales existantes suppose donc souvent d'importants travaux de transformation, et n'est parfois pas possible.

5.3.2 Grille à câbles / Grille à câbles électrifiés

Les grilles à câbles sont constituées de câbles en acier tendus horizontalement (Böttcher et al. 2019). Ces grilles sont utilisées de manière similaire aux grilles horizontales, en tant que barrières physiques, orientées de manière oblique par rapport à la direction de l'écoulement (angle d'incidence horizontal $\beta < 45^\circ$) (cf. point 5.3.1). L'espacement des câbles doit être identique à celui des barres des grilles horizontales. La barrière physique que représentent les câbles tendus empêche les poissons de pénétrer dans la turbine et l'orientation oblique dirige les poissons vers le *by-pass*. Tout comme la grille horizontale, la grille à câbles peut être combinée avec un sillon aménagé sur le fond et/ou une paroi plongeante ; elle doit être nettoyée avec

un dégrilleur. Les entretoises n'étant pas nécessaires, les pertes de charge causées par les grilles à câbles sont faibles.

La grille à câbles électrifiés est une grille de guidage hybride combinant le caractère mécanique avec l'aspect comportemental répulsif d'un champ électrique (Tutzer et al. 2019). Les câbles d'acier constituent le composant mécanique de la grille de guidage et servent simultanément d'anodes et de cathodes. La tension électrique appliquée aux câbles se situe dans la gamme des basses tensions, inoffensives pour les organismes vivants ; elle peut être ajustée en fonction des exigences du site et de la faune piscicole. Le champ électrique qui se forme autour des câbles exerce un effet dissuasif sur les poissons. Plus ces derniers sont longs, plus ils sont sensibles au courant électrique.

L'avantage de l'électrification des câbles réside dans le fait que l'espacement libre de ceux-ci peut être beaucoup plus grand qu'avec une grille à câbles conventionnelle ou que l'espacement des barres d'une grille horizontale. Les poissons qui pourraient facilement franchir la barrière en raison de leur taille sont repoussés par le champ électrique autour de la grille et sont guidés vers le *by-pass* grâce à la position oblique de la grille. En outre, l'espacement plus important des câbles et l'absence d'entretoises contribuent à réduire les pertes de charge et le risque d'encombrement par des débris flottants.

Une variante de la grille à câbles électrifiés a été développée à l'Université d'Innsbruck, variante dans laquelle les câbles peuvent être déposés au fond de la rivière en cas de forte crue ou de fort charriage, de sorte qu'il est inutile d'installer un dégrilleur. En cas d'encombrement local de la grille, les câbles peuvent être détendus individuellement ou en groupe. Un prototype de grille à câbles électrifiés a été mis en service en 2020 sur la Wertach, en Allemagne. Cependant, les résultats en matière d'exploitation et de protection des poissons font encore défaut.

Appréciation : les grilles à câbles électrifiés pourraient avoir un fort potentiel, à condition que les résultats positifs des tests de laboratoire en matière de protection des poissons et d'entretien soient confirmés par la pratique.

5.3.3 Grille verticale

Ce système de grille est caractérisé par des barres disposées verticalement. Il est mis en œuvre soit comme grille conventionnelle (*grille verticale droite*), soit comme grille inclinée par rapport à la verticale (*grille verticale inclinée* ; point 5.1.1, fig. 31). Dans ce dernier cas, les poissons sont dirigés vers un *by-pass* situé au niveau de la surface, ce qui est particulièrement difficile en ce qui concerne les espèces migrant sur le fond. En outre, un *by-pass* superficiel est quasi impossible à réaliser lorsque le niveau du bief d'amont n'est pas stable. L'effet de guidage est moins prononcé pour les grilles verticales inclinées que pour les grilles horizontales obliques (point 5.1.1), ce qui se traduit par un temps de séjour relativement long des poissons dans la zone d'entrée des grilles et donc aussi par un risque accru de prédation. En ce qui concerne la vitesse d'incidence, les mêmes exigences que pour les *grilles horizontales* s'appliquent (tab. 13).

Appréciation : lorsque l'espacement des barres et la vitesse d'incidence sont suffisamment faibles, les *grilles verticales* peuvent atteindre un effet protecteur équivalent à celui des *grilles horizontales*. Cependant, une orientation oblique par rapport à l'écoulement, qui permet d'obtenir le meilleur effet de guidage, n'est généralement pas réalisable avec des grilles verticales. Sur de grandes installations, les *grilles verticales* inclinées doivent être très longues et compromettent un nettoyage efficace au moyen d'un dégrilleur fonctionnant verticalement.

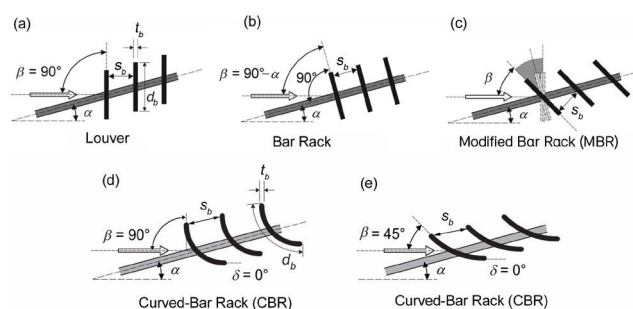
5.3.4 Bar racks et louvers

Les bar racks et les louvers (écrans à persiennes) sont des barrières positionnées de manière oblique par rapport au courant. Généralement, le flux incident arrive avec un angle $\beta \leq 90^\circ$ sur les barres (fig. 47). S'agissant des louvers cependant, cet angle est de 90° sur toute la longueur des barres. Les barres provoquent d'importantes pertes de charge, ce qui génère une onde stationnaire en amont de la barrière. Les gradients élevés de pression et de vitesse causés par cette onde sont perçus et évités par les poissons, ce qui améliore considérablement la fonction de guidage par rapport à une grille de protection avec le même espacement des barres (Kriewitz et al. 2012).

L'espacement des barres de ces barrières obliques par rapport au courant est de 25 à 300 mm (le plus souvent

Fig. 47 : Bar racks et louvers

Schéma du système : louver (a), bar rack (b), bar rack modifié (c), bar rack courbé (d, e) ; α = angle de la grille par rapport au flux incident (15°), β = angle des barres par rapport au flux incident, δ = angle des barres par rapport au flux émergent, db = longueur des barres, sb = espacement libre des barres, tb = épaisseur des barres, flèche = direction du courant



Source : Beck 2020

50 à 100 mm, Ebel 2018) ; elles peuvent donc également être utilisées sur les grands cours d'eau, contrairement aux grilles fines. Elles sont principalement utilisées en Amérique du Nord, où elles sont destinées à assurer une dévalaison inoffensive, en combinaison avec un *by-pass*, notamment pour les *salmonidés* (Amaral 2003).

Des tests sur d'autres espèces ont presque uniquement été menés en laboratoire (Kriewitz 2015, Beck 2020). Ces tests ont montré que les bar racks produisent généralement un meilleur effet de guidage que les louvers. Un effet de guidage particulièrement bon a été obtenu avec un espacement libre des barres de 50 mm, des vitesses d'incidence comprises entre 0,3 et 0,6 m/s et des angles d'incidence de 15° à 30° . L'aménagement d'un sillon sur le fond a fortement augmenté l'efficacité des bar racks lors d'essais de laboratoire avec de faibles profondeurs d'eau. Cependant, ces résultats n'ont pas encore été confirmés dans la pratique. Néanmoins, dans l'état actuel des connaissances, les bar racks combinés à un *by-pass* constituent le seul ouvrage de dévalaison dont l'utilisation pourrait être prometteuse et acceptable sur le plan opérationnel dans les grands ouvrages hydrauliques d'Europe centrale.

Les deux systèmes entraînent des pertes de charge plus importantes que les *grilles horizontales* en raison de la

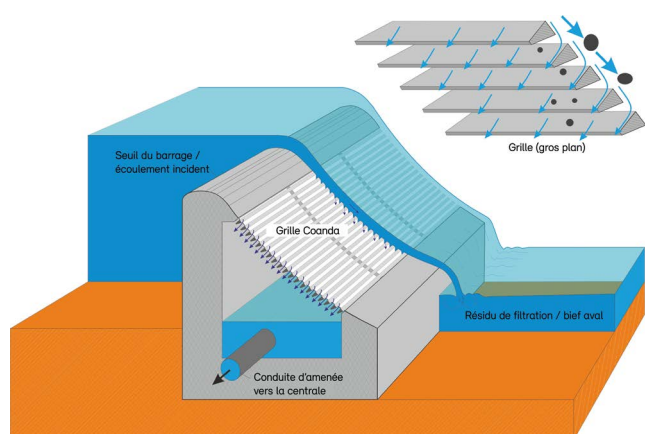
déviation du courant. Ils peuvent également influencer énormément le caractère de l'écoulement en aval de la barrière et donc le débit d'entrée de la turbine. Ces effets négatifs sur la production d'énergie sont nettement plus prononcés avec les louvers qu'avec les bar racks. Des développements tels que les bar racks courbés (curved bar racks) réduisent considérablement les pertes de charge (Beck 2020). En outre, les barres courbées agissent comme des redresseurs de flux, de sorte que la symétrie du flux d'entrée de la turbine peut être garantie. Cependant, les tests sur le terrain sont encore à effectuer.

Les coûts de construction des deux systèmes sont comparables à ceux d'une grille conventionnelle. Toutefois, en raison de la position oblique, la longueur à nettoyer et donc les coûts de nettoyage sont nettement plus importants.

5.3.5 Grille Coanda

En Suisse, les grilles Coanda sont utilisées comme prises d'eau sur une cinquantaine de cours d'eau (Vogel 2017). Ce type de grille est conçu comme une solution adaptée aux poissons pour remplacer la prise d'eau classique « tyrolienne ». Comme pour celle-ci, l'eau s'écoule par-dessus le seuil du barrage sur une grille placée directement en aval. Cependant, avec un espacement des barres de 0,2 à 3,0 mm, la grille Coanda est nettement plus fine que la prise d'eau tyrolienne (espacement des barres de 30 à 100 mm ; Vogel 2017).

Fig. 48 : Schéma d'une grille Coanda

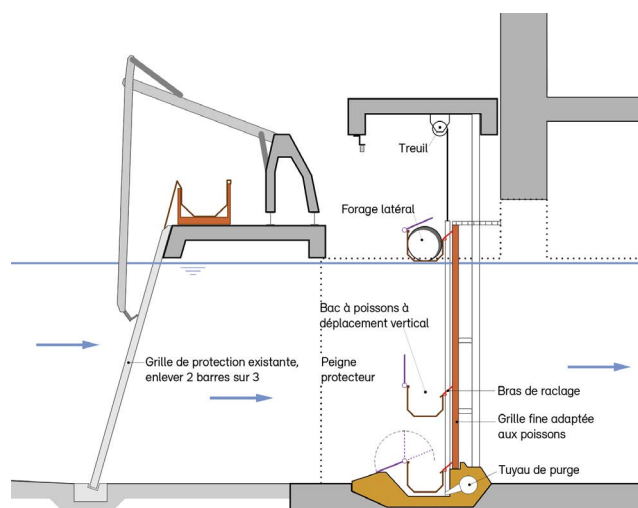


Source : Haute école spécialisée des Grisons

Grâce aux barres triangulaires étroitement alignées, la grille présente une surface lisse sur laquelle les poissons glissent sur un film d'eau. Une grande partie des éléments solides est également retenue de cette manière (fig. 48). Une partie du débit, généralement plus faible, s'écoule sur la grille, la nettoie et dote en même temps le *bief aval* de la prise d'eau. Ce débit résiduel doit ensuite assurer la dévalaison des poissons.

Appréciation : les grilles Coanda sont considérées comme « adaptées aux poissons » en raison du faible risque de blessure pour les poissons, grâce au faible espacement des barres. Une dévalaison sans blessures nécessite toutefois une dotation garantissant un film d'eau suffisant tout au long de la grille afin que les poissons ne restent pas bloqués dessus. De plus, un bassin suffisamment grand, contenant de l'eau en permanence et d'une profondeur d'au moins 50 cm est requis immédiatement en aval de la grille (OFEN 2017). Cependant, il n'existe pas de suivis des effets prouvant le « caractère adapté aux poissons ». En ce qui concerne l'entretien, il convient d'éviter un encombrement de la grille par des pierres. Le risque de blessure en cours de dévalaison pourrait toutefois augmenter au fil des années d'exploitation en raison de l'abrasion et de l'usure des profils de la grille.

Fig. 49 : Schéma de principe d'un bac de levage (d'après Hassinger, mod.)



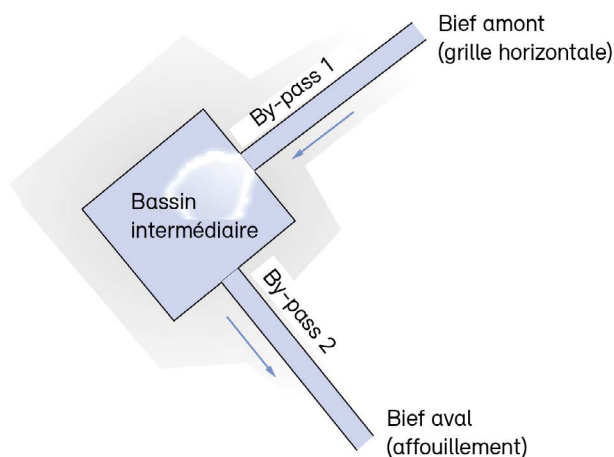
5.3.6 Bac de levage

Le bac de levage est un système combinant nettoyage de la grille fine et ouvrage de dévalaison (fig. 49). Il est installé en aval de la grille de protection, dont l'espacement des barres peut devoir être augmenté en retirant des barres pour assurer le passage des poissons. Si cela n'est pas possible ou pas judicieux, une nouvelle grille de protection avec un espacement des barres suffisamment grand doit être installée. Le bac de levage est constitué d'une gouttière placée juste à l'amont d'une grille fine. Le système est équipé d'un peigne pivotable aux fins de protection des poissons et d'un bras de raclage pour le nettoyage de la grille fine.

Il ressort des études de laboratoire menées à l'Université de Kassel (Hassingier 2012) que les poissons se rassemblent devant la grille fine. Le bac de levage est destiné à les « recueillir » et à les amener en toute sécurité dans le *bief aval* via un *by-pass*. Durant l'ascension du bac, qui s'effectue lentement et nettoie simultanément la grille fine, le peigne se trouve en position verticale et crée ainsi un abri contre l'écoulement, dans lequel les poissons se trouvant devant la grille fine peuvent se réfugier. Les débris dégrillés tombent dans le bac. Lorsque le peigne passe la surface de l'eau, il se referme sur le bac afin que les poissons ne puissent pas s'échapper. Le bac, une fois surélevé au-dessus du niveau des eaux en amont, est vidé dans une conduite à écoulement libre qui rejoint l'aval de la centrale hydraulique. Le bac est rincé avec de l'eau pompée, si bien que les poissons et les débris parviennent ensemble dans le *bief aval*.

Appréciation : le système est très compact et convient donc aussi aux espaces réduits. Les pertes d'eau sont à négliger. Jusqu'à présent, les effets sur la dévalaison n'ont été étudiés qu'en laboratoire. Un suivi des effets n'a pas pu être effectué sur le premier système mis en œuvre dans une centrale hydraulique, ayant depuis été démantelé en raison de problèmes techniques. Il n'est donc pas possible d'évaluer ce système de manière concluante. Il semble cependant qu'il ne puisse être utilisé que dans les cours d'eau présentant un transport modéré de bois flottant et de matières charriées.

Fig. 50 : Schéma de by-pass avec bassin intermédiaire aux fins de changement de direction



5.3.7 Systèmes de by-pass

Les *by-pass* sont conçus comme des conduites à écoulement libre, fermées ou ouvertes à la lumière (profil rectangulaire). Les conduites fermées nécessitent plus d'entretien, car, en général, elles s'obstruent plus facilement. Les risques d'obstruction sont d'autant plus élevés que les rayons des coudes et les diamètres des conduites fermées sont petits.

L'entrée du *by-pass* (profil d'entrée) s'effectue sur tout ou partie de la colonne d'eau (point 5.1.2). Dans de rares cas, un canal de *by-pass* est conçu sur toute la largeur de la centrale hydraulique avec plusieurs profils d'entrée décalés horizontalement (collection gallery), par exemple dans le cas des *grilles verticales* conventionnelles. Cependant, ce type de configuration ne fonctionne que pour les poissons migrant à proximité de la surface.

Afin de réduire au minimum les risques de blessure et d'embâcle dans les **coudes**, le rayon d'un coude (référence : axe de la conduite) ne doit pas être inférieur à cinq fois la largeur du *by-pass* ou à 3,0 m. Le coude peut être aménagé à proximité de l'entrée du *by-pass* si la vitesse d'écoulement y est encore faible. L'installation d'un bassin intermédiaire permettant un changement de direction tout en maintenant une faible vitesse d'écoulement (fig. 50) est une solution pour éviter la création d'un coude. À la centrale de Laubegg sur la Simme (point 13.2.2), des résultats positifs ont été obtenus avec la truite fario en 2017 dans le

cadre d'un suivi des effets. Il est essentiel que les débris ne s'accumulent pas dans le bassin intermédiaire, et donc que les matières flottantes soient rapidement évacuées.

Pour les *by-pass* longs disposant de plusieurs changements de direction, le drainage de la canalisation est envisageable. La totalité de l'eau de dotation n'est nécessaire que jusqu'à ce que les poissons ne puissent plus s'échapper du *by-pass*. Il est ensuite possible d'évacuer une partie de l'eau sur un tamis et de ne laisser qu'un film d'eau sur lequel les poissons glissent vers l'aval. Ce principe est similaire à celui d'un toboggan dans une piscine. Les changements de direction ne posent vraisemblablement pas de problème avec de tels systèmes. Ils sont utilisés aux États-Unis pour la dévalaison du saumon. Il ne semble pas que des expériences aient été réalisées avec d'autres espèces de poissons. Lorsque les flux traversant le *by-pass* sont très fluctuants, la technique de drainage se complique.

Le débit du *by-pass* est contrôlé par des dispositifs de régulation (p. ex. un déversoir à chute libre ; fig. 51). Pour réduire le débit, il peut être nécessaire d'installer des structures au niveau du profil d'entrée, par exemple une porte busquée posée sur un axe de rotation vertical (fig. 52). La vitesse d'écoulement à l'entrée ne devrait pas être régulée par le profil d'entrée, mais de préférence par une structure de régulation en aval. Dans le système « grille de guidage – *by-pass* » selon Ebel, Gluch & Kehl, une porte busquée disposée à l'entrée est combinée avec une

Fig. 51 : Système de bar racks courbes

Schéma de principe avec une entrée de by-pass sur toute la colonne d'eau et un barrage à surverse en forme de rampe disposée en aval comme structure de régulation.



Source : Beck 2020, mod.

Fig. 52 : Zone d'entrée d'un by-pass avec une porte busquée en service
Centrale de Rüchlig sur l'Aar (canton d'Argovie).



Source : W. Dönni

structure de régulation située en aval, qui élève le niveau d'eau de telle sorte que les valeurs limites soient respectées. Les organes à surverse ou à sousverse peuvent être utilisés comme **structures de régulation** limitant la hauteur d'eau (fig. 51). Pour éviter les gradients de vitesse abrupts, elles doivent être arrondies pour favoriser l'écoulement et, en outre, devraient posséder des propriétés autonettoyantes (Ebel et al. 2017).

Pour les déversoirs à chute libre dans les *by-pass*, le côté amont doit disposer d'une rampe de 1:6 à 1:2 au maximum. Ainsi ils ne constituent pas une barrière pour les poissons migrant près du fond et la vitesse du courant augmente de manière continue à l'approche de la crête du barrage. Sinon, il faut s'attendre à des réactions de fuite de la part des poissons. La vitesse d'écoulement maximale ne doit pas dépasser 7 m/s dans la surverse.

Les structures de régulation à surverse peuvent être mobiles ou fixes. Les structures mobiles (p. ex. les volets abaissables) sont surtout envisagées lorsque le *by-pass* possède une fonction de déversement en cas de crue, que des débris flottants et des matières charriées doivent être transférés ou que le niveau des eaux fluctue en amont.

Les structures de régulation à sousverse limitent le *couloir de migration* à la zone proche du fond, qui est privilégié par de nombreuses espèces pour la dévalaison. En règle générale, les vitesses d'écoulement au niveau

des ouvrages de régulation à sousverse sont trop élevées (c'est-à-dire $> 4,5$ m/s), de sorte que le niveau d'eau en aval doit être relevé par un ouvrage correspondant afin que les valeurs limites soient respectées. Les structures de régulation à sousverse ont tendance à favoriser la formation d'*embâcle* et ne sont donc pas recommandées.

L'embouchure des *by-pass* dans le *bief aval* s'effectue souvent via une chute libre (fig. 53). Dans ce cas, la hauteur de chute ne doit pas dépasser 2,5 m et la profondeur de l'eau en aval doit être d'au moins 1,3 m (Ebel 2018, p. 303). Dans d'autres cas, les poissons sont acheminés dans le *bief aval* par un toboggan. Le fond du *by-pass* peut également être raccordé sous le niveau de l'eau en aval (fig. 54), la vitesse maximale de sortie étant alors de 4,5 m/s.

En principe, il est possible de guider les poissons et les débris flottants dans le *bief aval* soit séparément, soit dans un canal commun. Cette dernière option fait partie du système « grille de guidage – *by-pass* » (Ebel et al. 2017), qui a fait ses preuves sur les plans biologique et opérationnel dans de nombreux cas. Si l'évacuation des débris flottants se fait par un canal séparé, la configuration est souvent problématique. En effet, le canal des déchets flottants et le canal de *by-pass* doivent tous deux être situés près de la grille pour fonctionner correctement, ce qui implique des limitations.

Fig. 53 : Sortie d'un *by-pass* dans le bief aval au niveau de la salle des machines

Centrale hydraulique Steinach sur la Kinzig (Allemagne).



Source : W. Dönni

Appréciation : si les valeurs cibles et les spécifications pour la zone d'entrée sont respectées (point 5.1.2 ; en particulier : vitesse d'écoulement augmentant uniformément, écoulement sans turbulences, évitement des courants de recirculation et des zones mortes), on peut supposer que les poissons qui dévalent pourront accéder au *by-pass* et atteindre le *bief aval* de la centrale en toute sécurité.

5.3.8 Vis sans fin

La vis d'Archimède est utilisée à diverses fins, et plus récemment aussi comme ouvrage de montaison (point 4.3.9.4). Au début des années 1980, la vis sans fin a été développée à partir du système original de franchissement (vis d'Archimède) par inversion énergétique de son mode d'action. Son but premier est de produire de l'énergie, mais il peut également assurer une dévalaison « douce ». La hauteur maximale de chute des vis sans fin est d'environ 10 m. Le débit de fonctionnement est limité à environ $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rehart GmbH, cité dans Eichenberger et al. 2011).

Outre la vis classique, il existe au moins deux nouveaux systèmes : les systèmes Rehart-Strasser et Hydro-Connect. Le système Rehart-Strasser présente, entre autres, les caractéristiques suivantes : une grille de protection à l'entrée, un caoutchouc apposé sur les arêtes à des fins de protection du poisson, une vitesse de rotation lente, de

Fig. 54 : *By-pass* en forme de puits

By-pass dont le fond se raccorde à environ 1 m en dessous du niveau le plus bas des eaux en aval (à gauche sur l'image).



Source : G. Ebel

petits entrefers et un palier inférieur sans aspérités. Le système Hydro-Connect est un système sans entrefers (stator fixe) offrant, selon les connaissances actuelles, un couloir de dévalaison sûr.

Le risque de blessure auquel sont soumis les poissons en dévalaison (5.1.3.1) peut être considérablement accru par de grands entrefers ou des spires avec des arêtes vives. De plus, les poissons entrants peuvent être touchés par les bords de la vis au moment de leur immersion. À cet égard, protéger les arêtes permet de réduire le risque de blessure associé (Schmalz 2010).

Appréciation : la vis sans fin combine la production d'électricité et la dévalaison, ce qui signifie que la dévalaison n'occasionne pas de perte de production. Toutefois, le système est d'abord utilisé pour la production d'électricité et ne constitue donc pas un ouvrage de franchissement en soi. À l'heure actuelle, on ne sait pas si ce système est réellement adapté à une dévalaison sans blessures, car l'évaluation du caractère adapté aux poissons des vis hydrodynamiques comporte encore des incertitudes. Il en va de même pour l'acceptation et la réparabilité des entrées de la vis proches de la surface (point 5.1.3). Par conséquent, dans l'état actuel des connaissances, la vis sans fin ne peut pas être recommandée comme ouvrage de dévalaison.

5.4 Solutions opérationnelles

Pour améliorer la dévalaison, on peut envisager non seulement des modifications structurelles, mais également des mesures opérationnelles. Sur la base des connaissances fondamentales de l'écologie des poissons, les mesures opérationnelles suivantes sont concevables, à condition que l'exploitation de la centrale hydraulique le permette et que les mesures soient proportionnées.

- Il est possible d'adapter le régime des centrales aux moments où la dévalaison bat son plein, en régulant les turbines afin de protéger les poissons (p. ex. ouverture des pales des turbines Kaplan), en abaissant temporairement les vannes ou même en suspendant l'exploitation de la centrale hydraulique. Comme il n'existe actuellement aucun système d'alerte précoce indi-

quant de manière fiable que la migration s'intensifie, il n'est possible de mettre en œuvre de telles mesures que pendant des plages horaires limitées (p. ex. abaissement des vannes par tranches de quelques heures en automne).

- Aux barrages à surverse, une proportion significative des poissons en dévalaison passe par-dessus les vannes. Lorsque la surverse est faible, celle-ci peut être concentrée sur le segment du barrage le plus proche du courant principal (près de la turbine ou du canal d'amenée). Il convient alors de tenir compte de la réparabilité des ouvrages de montaison.
- Les turbines Kaplan et VLH devraient être exploitées à pleine charge, la mortalité due aux turbines étant alors plus faible qu'à charge partielle en raison de la plus grande ouverture des pales (Mueller et al. 2020). Cependant, la gestion appropriée des turbines dans diverses conditions d'écoulement reste un défi.
- En l'absence de *by-pass*, il est envisageable de relever une vanne de purge située près de la grille, de 10 à 20 cm, au moment de la dévalaison des anguilles (en automne et la nuit). Les vitesses d'écoulement modérées dans la zone d'amenée de la vanne et les vitesses d'écoulement élevées à proximité immédiate de l'entrée de la vanne fonctionnent apparemment très bien pour les anguilles (Egg et al. 2018). Toutefois, une valeur limite de 4,5 m/s s'applique en ce qui concerne la vitesse d'écoulement dans l'ouverture du fond (Ebel 2018, p. 303).

Une difficulté majeure de la gestion adaptée aux poissons est que les périodes de migration spécifiques aux espèces et aux tailles des poissons indigènes sont à peine connues. De plus, elles durent souvent des semaines, voire des mois (p. ex. pour la truite de lac), de sorte que les mesures permanentes deviennent rapidement disproportionnées. Il est alors nécessaire de définir des fenêtres de dévalaison, bien que l'on dispose de peu d'expérience sur leur durée et leur fréquence. Des systèmes fiables qui pourraient détecter le début de la migration n'existent guère à l'heure actuelle (Bruijs & Vriese 2013, CIPR 2018).

6 Garantie de fonctionnement

Pour garantir la montaison et la dévalaison, les centrales hydrauliques doivent en général être pourvues d'ouvrages de franchissement, y compris s'il existe d'autres *couloir de migration* tels qu'une vanne ou une écluse. Par rapport à la section transversale d'un cours d'eau, un ouvrage de franchissement est un « trou d'aiguille » par lequel les poissons migrateurs doivent pouvoir passer le plus vite possible et sans le moindre risque de blessure. Un tel ouvrage ne peut constituer de fait qu'une solution de secours. En témoignent les spécifications imposées aux passes à fentes verticales, dont les dimensions géométriques doivent garantir le passage de l'espèce de poissons la plus grande et dont les conditions hydrauliques doivent convenir aux poissons les moins bons nageurs. Il est d'autant plus important que ce trou d'aiguille ne soit pas limité dans son fonctionnement.

6.1 Périodes de fonctionnement

Le métronome qui rythme la migration de la plupart des espèces de poissons nous est encore relativement inconnu : nous en savons très peu sur la fraction migratrice des populations piscicoles, sur le *couloir de migration* qu'elle choisit dans le cours d'eau et sur l'influence du comportement de chaque individu. En conséquence, les ouvrages devraient être pleinement opérationnels 365 jours par an, 24 heures sur 24. Mais puisqu'il faut trouver un compromis entre les exigences biologiques et la faisabilité technique et opérationnelle, il est établi que les ouvrages de montaison doivent au minimum être pleinement en service lorsque les débits sont compris entre Q_{30} et Q_{330} et lorsque les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval sont compris entre P_{30} et P_{330} .

La majeure partie des individus dont l'espèce migre chaque année vers l'aval peut passer un obstacle en quelques semaines, voire en quelques jours (Pavlov 1989). Comme la période de dévalaison est toutefois imprévisible dans l'état actuel des connaissances, il est impossible de recommander des périodes de fonctionnement ciblées. Dans les lacs de retenue où l'eau est captée à une profondeur de plusieurs mètres, il faut s'attendre à trouver des poissons dans les prises d'eau tout au long de l'année (Pavlov

1989) ; des ouvrages de dévalaison doivent donc être en service toute l'année, sauf les jours où le gel entraîne la formation de glace sur les grilles (DWA 2005).

De manière générale, les mises hors service hivernales, usuelles par le passé, sont des restrictions qui n'ont plus lieu d'être aujourd'hui (cf. point 3.1.1). Pour autant, certaines conditions difficiles – en particulier dans les petits cours d'eau de l'espace alpin – peuvent avoir pour effet que les ouvrages de franchissement ne sont même plus opérationnels pour les débits entre Q_{30} et Q_{330} (accès difficile en cas d'enneigement, formation de glace, débris flottants et matériaux charriés après un orage, faible débit en période de sécheresse, etc.). Une extension de la fenêtre de fonctionnement peut aussi être nécessaire – particulièrement dans la plage de débit supérieure – pour permettre la migration de frai des grands *salmonidés* (truites lacustres, saumons) dans les petits cours d'eau. Pour les centrales équipées de plusieurs ouvrages de franchissement, il peut être utile par ailleurs de mettre en service un ouvrage spécifique uniquement dans certaines situations (p. ex. déversement du barrage).

6.2 Entretien

La construction d'un ouvrage de franchissement pleinement opérationnel répond aux exigences légales en matière de migration piscicole. Mais seul un entretien régulier dans les règles de l'art peut préserver le bon fonctionnement de l'installation. La planification stratégique des cantons a montré que beaucoup d'ouvrages fonctionnent mal en raison d'un entretien insuffisant : la mise en œuvre d'un concept d'entretien approprié est indispensable, de même que la parfaite sécurisation de l'accès à l'ouvrage, l'entretien de toutes les parties vulnérables et une planification prévisionnelle visant à réduire la charge en matériaux solides. Le concept d'entretien doit également tenir compte de certains événements spéciaux (crues, charriage de glace, opérations de curage, etc.) lors desquels l'ouvrage ne doit jamais se retrouver à sec. Des informations détaillées sont disponibles dans Zaugg et al. (2017) et BVU (2018).

Conformément à l'annexe 3, ch. 3.2, let. b, de l'ordonnance du 1er novembre 2017 sur l'énergie (RS 730.01), les coûts d'entretien ne sont pas indemnisés dans le cadre de l'assainissement d'une installation hydroélectrique.

7 Suivi des effets

Même une installation équipée d'excellents ouvrages de franchissement constitue par nature une atteinte à la libre migration du poisson. Des contrôles sont donc nécessaires pour vérifier dans quelle mesure chaque ouvrage remplit son rôle et pour s'assurer qu'il n'existe plus aucune atteinte grave à la migration. Les principes permettant de réaliser des contrôles efficaces et conformes à la loi ont été décrits par Zaugg et al. (2017). Seuls sont résumés ici leurs éléments principaux.

Pour chaque projet de construction ou d'assainissement d'un ouvrage, y compris d'un ouvrage de petite taille, il est impératif de contrôler d'une part les exigences techniques et d'autre part l'impact biologique. Le contrôle de fonctionnalité technique consiste à vérifier les dimensions de toutes les parties importantes de l'ouvrage (bassins, *largeur de fente*, grilles de guidage, profondeur du bassin d'amortissement, etc.) et les conditions hydrauliques qui se créent à la mise en service de l'ouvrage (vitesses d'écoulement, profondeurs d'eau minimales, *courant d'attrait*, etc.).

Généralement, le **suivi biologique** ne peut pas intervenir avant que les exigences techniques ne soient remplies. Le concept correspondant doit être élaboré dans le cadre de la planification et associé à la demande de financement relative aux mesures prévues. Il s'agit de définir les principaux objectifs de l'assainissement, qui doivent pouvoir être mesurés à l'aide de critères biologiques. Il faut ensuite déterminer les paramètres d'investigation nécessaires, ainsi que les méthodes d'investigation les mieux adaptées. L'étape suivante consiste à définir quand et pendant combien de temps ces investigations doivent avoir lieu, en tenant compte des synergies possibles avec l'assainissement d'autres installations. S'il existe plusieurs centrales voisines sur le même cours d'eau, il est judicieux de procéder à leur contrôle respectif au même moment. Enfin, le concept doit formuler les principes selon lesquels les résultats obtenus seront évalués et désigner les aspects dont il faudra rendre compte dans le rapport à l'attention des autorités.

Le suivi biologique inclut toujours une appréciation des résultats, réalisée sur la base de critères dérivés des objectifs d'assainissement. Cette appréciation doit s'inspirer de standards déjà établis et se conformer à différents principes (voir les détails dans Zaugg et al. 2017).

Si le suivi biologique met au jour des déficits, d'autres mesures doivent être étudiées ; la façon de procéder en pareil cas est décrite dans Zaugg et al. (2017). Pour qu'une installation puisse être considérée comme assainie, il faut pouvoir attester que les objectifs de son assainissement ont été atteints.

8 Démantèlement

Sur le plan ichtyo-écologique, la mise à l'arrêt ou le démantèlement d'une installation est toujours la meilleure solution, puisque même une installation équipée d'excellents ouvrages de franchissement constitue une atteinte à la libre migration du poisson. Sur le plan de l'exploitation ou de la politique énergétique en revanche, le démantèlement ou l'arrêt d'utilisation n'est généralement pas l'option souhaitée. Pour autant, si l'assainissement n'est pas possible ou pas judicieux pour des raisons techniques ou financières, le démantèlement peut s'imposer comme la meilleure option possible. Dans le cas des petites et très petites centrales qui sont en partie vétustes, qui ne sont plus exploitées ou qui sont en mauvais état, et dans le cas également des barrages auxiliaires des grandes installations, il peut être plus intéressant d'envisager un démantèlement ou une mise à l'arrêt total ou partiel plutôt que d'investir dans des ouvrages de franchissement généralement beaucoup plus coûteux.

Démonter l'installation dans son intégralité n'est pas toujours nécessaire : selon le site, il suffit parfois de démonter uniquement les structures qui entravent la migration des poissons ou qui risquent de les blesser. Le démantèlement d'un barrage sur un cours d'eau avec une certaine pente, particulièrement en milieu urbain, n'est souvent possible que moyennant des mesures de stabilisation du lit et des berges. En pareils cas, il convient d'étudier une solution de remplacement, par exemple une rampe en blocs de pierre.

9 Proportionnalité

9.1 Principe

Les mesures imposées visant à concrétiser des objectifs répondant à un intérêt public doivent se conformer au principe de proportionnalité inscrit dans la Constitution (art. 5, al. 2). Selon ce principe, une mesure est proportionnée si elle est adéquate, nécessaire et raisonnable pour conduire à la réalisation de l'objectif visé. Ce principe s'applique également aux mesures destinées à mettre en place des ouvrages de franchissement piscicole, tel qu'exigé par la loi, et à garantir la protection des poissons.

Les décisions d'assainissement prises par les cantons concernent nécessairement des installations pour lesquelles la proportionnalité de l'assainissement a été pré-

ablement confirmée (dans le cadre de la planification des assainissements). Ces installations sont donc soumises à l'obligation d'assainir. Mais comme les mesures concrètes d'assainissement n'étaient pas encore connues au moment de la décision, il est également nécessaire d'évaluer, lors de la planification, la proportionnalité des mesures proposées (variantes). Le projet d'assainissement ne peut être abandonné que si aucune mesure proportionnée ne peut être prise, ce qui est très rarement le cas.

9.2 Évaluation

L'étude des variantes proposées est généralement l'occasion de procéder à une première évaluation sommaire de

Tab. 14 : Sélection de paramètres biologiques et hydrauliques pertinents, pour lesquels l'autorité qui délivre les autorisations attend des affirmations concrètes. D'autres paramètres peuvent avoir leur importance en fonction des spécificités du site ou de l'installation.

	Paramètre	Variables spécifiques	Description Source
Poisson	Espèce ou guildes	Zonation piscicole	Prescriptions du service cantonal spécialisé
	Longueur, largeur et hauteur corporelles	Espèce, cours d'eau	Ebel 2018 (p. 195 ss)
	Vitesse de croisière (nage)	Espèce, longueur corporelle, température	Équations modèles et tableaux dans Ebel 2018 (p. 194 et 288)
	Positionnement dans la colonne d'eau	Espèce	Profondeur d'eau ; exemples dans Ebel 2018 (p. 70 ss)
	Comportement grégaire	Espèce	Important pour les salmonidés et les cyprinidés en particulier
	Importance de la température de l'eau	Espèce	Important pour la capacité de nage et la dévalaison
Hydrologie /Hydraulique	Débit d'équipement	Installation	Données de l'installation
	Déversement du barrage	Ampleur, fréquence, durée, période de l'année	Station de mesure, données d'exploitation
	Hauteur de chute	Installation	Données de l'installation
	Rapport niveau/débit dans les biefs amont et aval	Installation	Données d'exploitation
	Courbe de niveaux d'eau dans les biefs amont et aval	Installation, débit	Station de mesure
	Conditions d'écoulement	Installation, débit	Vitesses d'écoulement, courants de recirculation, rouleaux
	Profondeur d'écoulement	Installation, débit	Données d'exploitation
	Morphologie	Installation	Structures de guidage, corps perturbateurs, bassins d'amortissement
	Apport de matériaux solides	Installation, débit	Bois flottant, matériaux charriés, matières en suspension

la proportionnalité (cf. chap. 10. Si les conditions viennent à changer dans la suite de la planification, une nouvelle évaluation peut alors s'avérer nécessaire. La confirmation formelle de la proportionnalité n'intervient toutefois qu'avec la décision d'octroi de l'indemnisation.

9.2.1 Adéquation (réalisation de l'objectif)

Une mesure est adéquate si elle a pour effet une amélioration appropriée de la migration piscicole. L'évaluation de cet effet se rapporte au potentiel écologique, ainsi qu'à la faisabilité technique du franchissement d'obstacle. Le potentiel écologique doit être estimé sur la base de connaissances locales. Les facteurs suivants peuvent aussi être utiles¹⁰ :

- taille du cours d'eau ;
- mise en réseau d'habitats importants (p. ex. frayères, zones d'embouchure) ou de populations ;
- diversité des espèces ;
- présence d'espèces menacées ou d'espèces prioritaires au niveau national ;
- présence d'espèces de poissons migrateurs ;
- présence d'une population précieuse du point de vue de la génétique et capable de se maintenir seule.

D'un côté, il est souvent impossible, faute de place, de mettre en œuvre la solution optimale du point de vue technique. De l'autre, des concessions trop importantes par rapport à une telle solution peuvent avoir pour effet que la mesure envisagée n'est plus proportionnée (utilité réduite). Il y a donc lieu d'évaluer le rapport entre ce qu'il est possible de réaliser techniquement (d'après l'état actuel de la technique) et la solution optimale du point de vue de la biologie. Cet « objectif technique » est évalué en fonction du degré de réalisation des objectifs d'assainissement (Zaugg et al. 2017). Un ouvrage de franchissement piscicole « fonctionne » lorsque tous les objectifs d'assainissement pertinents sont atteints et que la réussite de la mesure a été attestée par un suivi des effets.

En règle générale, les paramètres « potentiel écologique » et « objectif technique » peuvent seulement être évalués qualitativement.

9.2.2 Rapport coût-bénéfice

Une mesure ne doit pas dépasser le cadre de ce qui est légalement requis. Elle est considérée comme nécessaire dès lors que la variante la moins coûteuse est capable d'atteindre l'objectif visé. L'estimation du coût global fait partie intégrante de la planification ; elle doit prendre en compte la totalité des frais engagés pour la planification, la construction, le contrôle, l'entretien et les éventuelles pertes de production. Le fait que ce coût global soit considéré comme faible, moyen ou élevé dépend du site concerné. L'appréciation de la réalisation de l'objectif se rapporte au potentiel écologique du cours d'eau : plus le potentiel écologique est élevé, plus le degré de réalisation de l'objectif doit l'être lui aussi.

L'appréciation de la réalisation de l'objectif et du coût global peut être représentée sous une forme simplifiée à l'aide d'un graphique coût-bénéfice. La représentation graphique de la proportionnalité des différentes variantes peut être utile pour déterminer la meilleure d'entre elles.

9.2.3 Caractère raisonnable

Une mesure est raisonnable si le rapport avec la charge imposée à l'exploitant de la centrale ou à d'autres utilisateurs demeure approprié. S'agissant des éventuelles pertes de production, la mesure est en principe raisonnable puisque les coûts sont indemnisés pendant 40 ans par le fonds national alimenté par le supplément réseau. Si ces pertes de production sont importantes, un examen approfondi est toutefois nécessaire. D'autres limitations sont concevables, par exemple en rapport avec l'aspect visuel du site ou du paysage. À titre d'exemple, une grande structure en béton (p. ex. une passe à fentes verticales) construite sur un petit cours d'eau cheminant à travers un décor naturel intact peut altérer de façon disproportionnée les qualités esthétiques du paysage.

¹⁰ Critères de l'OFEV pour la priorisation des installations à assainir dans le cadre de la planification stratégique de la migration piscicole

10 Principes de planification

Avant de commencer la planification technique d'un ouvrage de franchissement ou d'un système de protection des poissons, il convient de définir les *espèce cibles* propres au site considéré, avec leurs stades de développement, et de caractériser leurs paramètres biologiques (tab. 14). Il faut par ailleurs réunir les données hydrologiques, hydrauliques et techniques pertinentes pour la planification.

Les variantes proposées sont étudiées sur la base de ces paramètres *d'entrée*. Cette étude ne doit décrire en détail que les variantes qui sont a priori appropriées. Si des solutions standard évidentes ne sont pas retenues dans l'étude, il convient toutefois de fournir une explication brève mais argumentée. Le démantèlement de l'ouvrage est toujours une variante à étudier (cf. point 8). Les variantes doivent être caractérisées par rapport à leur disposition sur le site. Pour cela, des modèles numériques peuvent s'avérer très utiles, en particulier dans le cas d'installations complexes ou de grande taille (se reporter p. ex. à Feigenwinter et al. [2019] concernant l'emplacement des *grilles horizontales*). Enfin, les variantes doivent faire l'objet d'une évaluation portant sur le degré de réalisation de l'objectif et sur le montant estimatif des coûts.

L'étape suivante consiste à dimensionner et à concevoir en détail la variante retenue comme étant la meilleure, dans le respect des valeurs limites prescrites. Tout non-respect d'une valeur limite doit être justifié. Les parties de l'ouvrage qui feront ultérieurement l'objet d'un suivi des effets doivent être désignées. Il faut par ailleurs procéder à une estimation détaillée des coûts et à une nouvelle évaluation de l'impact biologique attendu. Enfin, un concept doit être élaboré afin de préparer le suivi des effets et les opérations d'entretien, y compris pour les ouvrages de petite taille (Zaugg et al. 2017).

En principe, toutes les planifications, prévisions et expertises doivent être réalisées d'après l'état actuel des connaissances et de la technique, qui peut aller au-delà des prescriptions du présent rapport. Par ailleurs, tous les ouvrages doivent être planifiés de manière à nécessiter seulement un entretien raisonnable et à faciliter la réalisation des travaux de maintenance. Enfin, ils doivent être

capables de supporter sans dommage une forte charge en eau, en glace, en matériaux charriés ou en bois flottant. Dans tous les cas, des solutions spécifiques et adaptées au site doivent être développées par des spécialistes de la biologie piscicole et de l'aménagement des cours d'eau (domaine de l'hydraulique compris). Les mesures doivent être proportionnées (cf. point 9).

Les affirmations avancées ici concernant la conception technique des ouvrages de franchissement piscicole se rapportent en premier lieu aux cours d'eau de basse et moyenne altitude. S'agissant des ouvrages hydro-électriques construits sur de petits cours d'eau de haute altitude, nous manquons encore d'expérience, faute de contrôles probants. Les solutions qui fonctionnent sur les rivières du Plateau ne sont pas nécessairement efficaces pour des petits ruisseaux de montagne. En principe, les valeurs limites définies valent aussi pour ces ouvrages, même si tous les paramètres ne sont pas aussi pertinents et si d'autres conditions peuvent prévaloir. Dans tous les cas, il convient de développer des solutions spécifiques, adaptées au site et proportionnées.

Lors de la planification, la flexibilité est de mise : cela signifie par exemple que le débit de dotation, les éléments qui composent un ouvrage aménagé de manière quasi naturelle ou l'emplacement des blocs de déviation dans une passe à fentes verticales sont variables (Gebler & Schmid 2016).

11 Bibliographie

- Aarestrup K., Lucas M. C., Hansen J. A. 2003 : Efficiency of a nature-like bypass for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry. *Ecology of freshwater fish*, 12, pp. 160 – 168.
- Adam B. 2010 : Ethohydraulik – Ein neuer Ansatz zur Analyse der Durchgängigkeit. Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen – Ökohydraulische Grundlagen, Mess- und Modellierungsansätze. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Karlsruhe, pp. 23 – 30.
- Adam B., Engler O., Schwevers U. 2018 : HDX Wupper, Projektbericht. Im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf, 143 p.
- Adam B., Schwevers U. 1998 : Zur Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen – Verhaltensbeobachtungen an Fischen in einem Modellgerinne. *Wasser und Boden* 50(4), pp. 55 – 58.
- Adam B., Schwevers U. 2018 : Neue Erkenntnisse zum Wanderverhalten diadromer und potamodromer Fische mittels RFID-Technologie (PIT-Tagging). SVK Fischereitagung, p. 18.
- Amaral S. V. 2003 : The use of angled bar racks and louvers for guiding fish at FERC-licensed projects. FERC fish passage workshop, Holden, MA.
- Armstrong G. S., Aprahamian M. W., Fewings A. G., Gough P. J., Reader N. A., Varallo P. V. 2010 : Environment Agency fish pass manual: Guidance notes on the legislation, selection and approval of fish passes in England and Wales. Environment Agency, Bristol, 369 p.
- Armstrong J. D., Kemp P. S., Kennedy G. J. A., Ladle M., Milner N. J. 2003 : Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research*, 62, 2, pp. 143 – 170.
- Bammatter L., Baumgartner M., Greuter L., Haertel-Borer S., Huber Gysi M., Nitsche M., Thomas G. 2015 : Renaturation des eaux suisses : plans d'assainissement des can-
tons dès 2015. Office fédéral de l'environnement, OFEV, 13 p.
- Beck C. 2020 : Fish protection and fish guidance at water intakes using innovative curved-bar rack bypass systems. VAW-Mitteilung 257 (R.M. Boes, éd), VAW, EPF Zurich, Suisse. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2020-2029.html>.
- Berger C. 2017 : Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien. Dissertation Technische Universität Darmstadt, 211 p.
- Bermudez M., Puertas J., Cea L., Pena L., Balairon L. 2010 : Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering*, 36, pp. 1355 – 1364.
- Bezirksregierung Köln. 2019 : Abschlussbericht zum Projekt Fischschutz und Fischabstieg an der Pilotanlage Unkelmühle, 118 p.
- Bleckmann H. 2010 : Das Schwimmverhalten von Fischen in laminarer und turbulenter Umgebung. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesanstalt für Wasserbau (éd.) : Ökohydraulische Grundlagen, Mess- und Modellierungsansätze. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen am 11./12. Mai 2010 in Karlsruhe, pp. 17 – 22.
- BMLFUW 2012 : Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienne, 102 p.
- Böttcher H., Zeiringer B., Brinkmeier B., Aufleger M. 2019 : Verhaltensuntersuchungen zum Fischschutz und Fischabstieg am Seilrechen. *WasserWirtschaft*, 109(2 – 3), pp. 29 – 35
- Brujns M. C. M., Vriese F. T. 2013 : Workshop fish protection at hydropower stations in the River Meuse, the Netherlands, 71 p.

- Bunt C. M., Castro-Santos T., Haro A. 2012 : Performance of fish passage of structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* 28, 4, pp. 457 – 478.
- BVU 2018 : Unterhalt von Fischwanderhilfen. Bau, Verkehr und Umwelt Kanton Aargau, 5 p.
- Cada G. F. 2001 : The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival. *Fisheries* 26, pp. 14 – 23.
- Calles E. O., Greenberg L. A. 2007 : The use of two nature-like fishways by some fish species in the Swedish River Eman. *Ecology of freshwater fish*, 16, pp. 183 – 190.
- Castro-Santos T., Haro A. 2010 : Fish guidance and passage at barriers. In : P. Domenci, P., Kapoor, B. G. (éd.), *Fish locomotion : An eco-ethological perspective*, pp 62-89. Enfield, NH : Science Publishers. <https://doi.org/10.1201/b1019>.
- Chapman B.B., Brönmark C., Nilsson J.Å., Hansson L.A. 2011 : The ecology and evolution of partial migration. *Oikos* 120, pp. 1764 – 1775.
- Clay C. H. 1995 : Design of Fishways and other Fish Facilities. *Page Transactions of the American Fisheries Society*, 2^e édition.
- Cooke S. J., Hatry C., Hasler C. T., Smokorowski K. E. 2011 : Literature review, synthesis and proposed guidelines related to the biological evaluation of «fish friendly» very low head turbine technology in Canada. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2931, 33 p.
- Coutant C. C. 2001 : Integrated, multi-sensory, behavioral guidance systems for fish diversions. *American Fisheries Society Symposium* 26, pp. 105 – 113.
- Cuchet M., Geiger F., Rutschmann P. 2018 : Zum Fischschutz und Fischabstieg an geneigten und horizontalen Rechen. *Wasserwirtschaft*, pp. 36 – 40.
- Dönni W., Boller L. 2011 : Fischabstieg: Anlagen in Deutschland überzeugen. Dokumentation von zwei Anlagen an der Saale in Sachsen-Anhalt. *WWF Suisse*, 8 p.
- Dönni W., Boller L., Zaugg C. 2016 : Profondeurs minimales pour les truites de lac et de rivière. Bases scientifiques et recommandations. Étude mandatée par l'Office fédéral de l'environnement, 43 p.
- Dumont U. 2011 : Wasserkraft, Fischschutz und Fischabstieg. Vortrag im Rahmen Ökologische Durchlässigkeit in Fließgewässern. Lebus, D, Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV).
- Dumont U., Anderer P., Schwevers U. 2005 : Handbuch Querbauwerke. Ministerium für Umwelt und Naturschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 212 p.
- DWA 2005 : Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen. Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. 2^e édition corrigée. DWA-Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 256 p.
- DWA 2016 : Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 334 p.
- Ebel G. 2008 : Turbinenbedingte Schädigung des Aals (*Anguilla anguilla*) Schädigungsraten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Möglichkeiten der Prognose. *Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie* 3, 176 p.
- Ebel G. 2014 : Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten – Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen. *Wasserwirtschaft* 2014 (7/8), pp. 40 – 47.
- Ebel G. 2017 : Bemessung und Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen – eine kritische Diskussion aktueller ethohydraulischer Befunde. *Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie* 5, 12 p.
- Ebel G. 2018 : Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. *Ingenieurbioologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus*

dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4 (3^e édition), 483 p.

Ebel G., Gluch A., Kehl M. 2017 : Einsatz des Leitrochen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. In : Heimerl, S., Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern. Springer, pp. 196 – 206.

Ebel G., Kehl M., Gluch, A. 2018 : Fortschritte beim Fischschutz und Fischabstieg: Inbetriebnahme der Pilot-Wasserkraftanlagen Freyburg und Öblitz. WasserWirtschaft 9/2018, pp. 54 – 62.

Egg L., Müller M., Pander J., Knott J., Geist J. 2017 : Improving European Silver Eel (*Anguilla anguilla*) downstream migration by undershot sluice gate management at a small-scale hydropower plant. Ecological Engineering 106, pp. 349 – 357.

Eichenberger P., Scherrer I, Chapallaz J.-M., Wiget M. (2011) : Evaluation von Ultra-Niederdruckkonzepten für Schweizer Flüsse; Innovationen, Eignungskriterien und Erfahrungsberichte. Mandant : Office fédéral de l'énergie OFEN ; mandataire : Entegra Wasserkraft AG. Rapport final, 13 juillet 2011.

Ellinger H., Melcher J., Parthl G., Schifflleithner V. 2016 : Funktionskontrolle & Funktionsnachweis der Fischaufstiegshilfe BEW Kraftwerk GmbH / Feistriz. Mandataire : Dipl.-Ing. Günter Parthl Ingenieurbüro für angewandte Gewässerökologie, 21 p.

ezb 2013 : Ökologisches Monitoring der Pendelrampe Grosse Tulln – Leitsberg. Mandant : Wasserverband Große Tulln im Wege der WA3, Amt der NÖ Landesregierung WA3. Traitement : Eberstaller Zauner Büros, TB f. Angewandte Gewässerökologie, Fischereiwirtschaft, Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, 92 p.

ezb 2017 : Fischaufstiegsschnecken: Funktionsfähigkeit und Eignung für unterschiedliche Standorte zum gegenwärtigen Wissensstand. Studie i.A. der OÖ. Umweltanwaltschaft. Traitement : ezb – TB Zauner GmbH, 59 p.

Feigenwinter L., Vetsch D., Kammerer S., Kriewitz C. R., Boes R. 2019 : Konzeptionelle Standortanalyse von Fischleitrochen mit Hilfe numerischer 3-D-Simulationen. Wasser Energie Luft 111, pp. 9 – 15.

Fischer J., Schmalz M. 2016 : Fischaufstieg ohne Erzeugungsverluste – geht das? Innovative und EU-patentierete Druckkammerfischschleuse mit energetischer Nutzung an der Talsperre Höllenstein. Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (12), pp. 746 – 751.

Fish F. E. 2010 : Swimming strategies for energy economy. In : Domenici, P., Kapoor, B. G. Fish locomotion – an eco-ethological perspective. Science Publishers, New Hampshire, pp. 90 – 122.

Franklin A. E., Haro A., Castro-Santos T., Noreika J. 2012 : Evaluation of nature-like and technical fishways for the passage of Alewives at two coastal streams in New England. Transactions of the American Fisheries Society, 141, pp. 624 – 637.

Gebhardt M., Rudolph T., Kampke W., Eisenhauer N. 2017 : Fischabstieg über Schlauchwehre: Untersuchungen der Strömungsverhältnisse und Identifizierung der Abflussbereiche mit erhöhtem Verletzungsrisiko. In : Heimerl, S., Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern, Springer, pp. 500 – 509.

Gebler R.-J. 1998 : Examples of near-natural fish passes in Germany: drop structure conversions, fish ramps and bypass channels. In : Jungwirth, M., Schmutz, S., Weiss, S. (éd). Fish migration and fish bypasses. Fishing News Books, Oxford, pp. 403 – 419.

Gebler R.-J. 2009 : Fischwege und Sohlengleiten. Band I: Sohlengleiten. Grundlagen und Beispiele aus der Praxis. Verlag Wasser + Umwelt, 205 p.

Gebler R.-J. 2015 : Dimensionierung von Schlitzpässen – Anforderungen der Fische und der Hydraulik. Wasserwirtschaft 7/8, pp. 73 – 79.

Gebler R.-J., Michel M. 2003 : Fischweg KW Reichenau am Alpenrhein. Schlüsselfunktion für die Bodensee-Seeforelle. Amt für Jagd und Fischerei Graubünden, 12 p.

- Gebler R.-J., Schmid H. 2016 : Flexibilität in der Bauweise, umsetzbare Anforderung? In : Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr. Schlüsselfragen bei der Umsetzung von Massnahmen zum Fischaufstieg. Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, pp. 63 – 69.
- Härry A. 1917 : Die Fischwege an Wehren und Wasserwerken in der Schweiz. Schweizerischer Wasserwirtschafts-Verband 5, 115 p.
- Hassinger R. 2009 : Borsten-Fischpässe und Fisch-Kanu-Pässe – Beschreibung des Standes der Technik. Institut für Umwelttechnik und Wasserbau, Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, 11 p.
- Hassinger R. 2012 : Hochwertiger Fischschutz: Kombination von modernem Feinrechen mit raschem und schonendem Fischabstieg, 23. SVK-Fischereitagung am 05. und 06. März 2012, 13 p.
- Hefti D. 2012 : Migration du poisson vers l'amont et vers l'aval à la hauteur des ouvrages hydroélectriques. Checklist Best practice. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement no 1210, 79 p.
- Helbig U., Aigner D., Stamm J., Zimmermann R. 2016 : Untersuchungen zur Hydraulik in Rundbeckenpässen. In : Proceedings zum 18. Wasserbau-Symposium, 29.6.-1.7.2016, Wallgau (TU Munich, TU Graz, EPF Zurich) (2016).
- Heneka P. 2019 : BAW-Empfehlung für die Bemessung der Leitströmung von Fischaufstiegsanlagen an Standorten mit Wasserkraftnutzung für den kraftwerksnahen Einstieg, 34 p.
- Heneka P. ; Mahl L. ; Weichert R. 2019 : Hydraulische Methoden zur Bemessung der Leitströmung einer Fischaufstiegsanlage. In : Bundesanstalt für Gewässerkunde (éd.) : Standardisierung von Fischaufstiegsanlagen – Notwendigkeit, Möglichkeiten und Grenzen. 6. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen, am 6./7. Juni 2018 in Koblenz – BfG-Veranstaltungen 1/2019. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde. pp. 36 – 42.
- Henning M., Weichert R. 2020 : Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand. BAW Mitteilungen, n° 106, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), pp. 7 – 14.
- Hogan T. W., Cada G. F., Amaral S. V. 2014 : The status of environmentally enhanced hydropower turbines. Fisheries, 39, 4, pp. 164 – 172.
- IKSR 2018 : Masterplan Wanderfische Rhein. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), 92 p.
- Juhrig L. 2011 : Die Very-Low-Head-Turbine – Technik und Anwendung. Wasserwirtschaft, 10, pp. 1 – 6.
- Katopodis C., Gervais R. 2016 : Fish swimming performance database and analyses. DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2016002, 550 p.
- Kaufmann S. 2012 : Charakterisierung eines grossen Umgehungsgewässers (Aarekraftwerk Ruppoldingen) mit Fokus auf die Migrationsrichtung von Alet und Barbe. Mémoire de master, EPF Zurich, 103 p.
- Kirchhofer A., Hässig P. 2016 : Fischpassage durch die Turbinen. Étude mandatée par l'Office fédéral de l'environnement, 42 p.
- Klopries E.-M., Deng Z. D., Lachmann T. U., Schüttrumpf H., Trumbo B. A. 2018 : Surface bypass as a means of protecting downstream-migrating fish : lack of standardised evaluation criteria complicates evaluation of efficacy. Marine and Freshwater Research 69, pp. 1882 – 1893.
- Kriewitz C. R., Albayrak I., Boes R.M. 2012 : Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Zwischenbericht zum Literatur- und Massnahmenstudium.
- Lange, D. 2007 : Blockrampen- ökologische Bauwerke zur Sohlenstabilisierung. In : Minor, H.-E. (éd.), Blockrampen: Anforderungen und Bauweisen. EPF Zurich : Zurich, pp. 5 – 21.
- Larinier M. 2002 : Chapter 4 Location of Fishways. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture (364) : pp. 39 – 53.

- Larinier, M., Travade, F. 2002 : Downstream migration : problems and facilities. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture (364) : pp. 181 – 207.
- Lehmann B., Adam B., Engler O., Hecht V., Schneider K. 2016 : Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. Naturschutz und biologische Vielfalt 151, 156 p.
- LUBW 2016 : Handreichung Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Fachliche Grundlagen. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 30 p.
- Lucas M.C., Baras E. 2001 : Migration of Freshwater Fishes. Oxford : Blackwell Science, 419 p.
- Lüderitz V., Speierl T., Langheinrich U., Seidel M. 2017 : Eignung von Fischaufstiegsanlagen an Obermain und Rodach als Lebensräume und Migrationshilfen für Fische und Makroinvertebraten. In : Heimerl, S. (éd.). Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern – Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift Wasserwirtschaft, pp. 129 – 139.
- Lupandin A. J. 2005 : Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. Biology Bulletin, Vol. 32, 5, pp. 461 – 466.
- Mader H., Tauber M.-M. 2010 : Der neue Multi-Struktur-Schlitzpass. Wasserwirtschaft 7 – 8, pp. 28 – 32.
- Meister J. 2020 : Fish protection at hydropower plants with horizontal bar rack bypass systems. In : Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, pp. 258 – 262.
- Mende M., Dönni, W., Helbig, U., Rathke, K. 2019 : Der Rundbeckenfischpass – eine Alternative zum konventionellen Schlitzpass. Wasser Energie Luft 111, pp. 243 – 254.
- Mende M., Gassmann E. 2009 : Pendelrampen – Funktionsweise und Erfahrungen, Praxisbeispiel Scherlibach, Gemeinde Köniz / Kanton Bern. Ingenieurbiologie, n° 3, pp. 29 – 36.
- Meyer M., Schweizer S., Andrey E., Fankhauser A., Schläppi S., Müller W., Flück M. 2016 : Der Fischlift am Gadmerwasser im Berner Oberland, Schweiz. Springer : Wasserwirtschaft (2/3), pp. 42 – 48.
- Meyer M., Schweizer S., Kriewitz-Byun C.-R. 2017 : Der Fischlift am Gadmerwasser – Erfahrungen und Optimierungsvorschläge. Springer : Wasserwirtschaft (2/3), pp. 77 – 81.
- Mueller M., Knott J., Pander J., Geist J 2020 : Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen. Zusammenfassung zum Abschlussbericht 2020 Band 11: Standortübergreifende Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie (ohne Schachtkraftwerk). Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 15 p.
- Noonan M. J., Grant J. W. A., Jackson C. D. 2012 : A quantitative assessment of fish passage efficiency. Fish and Fisheries, 13, pp. 450 – 464.
- OFEN 2017 : Optimierung der Coanda-Rechen für Schweizer Gewässer. Schlussbericht 30.03.2017. Mandant : Office fédéral de l'énergie ; mandataire : Hochschule für Technik und Wirtschaft ; auteurs : Lifa, I., Schlegel, F., Dosch, S., 71 p.
- ONEMA 2014 : Assessing the passage of obstacles by fish – Concepts, design and application. Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 202 p.
- Pander J. Mueller M., Geist J. 2013 : Ecological functions of fish bypass channels in streams : migration corridor and habitat for rheophilic species. River Research and Applications, 29, pp. 441 – 450.
- Pavlov, D. S. 1989. Structures assisting the migration of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper, 308, FAO, Rome, 97 p.
- Pavlov D. S. 1989 : Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper, 308, FAO, Rome, 97 p.
- Pavlov D. S., Lupandin I. A., Skorobogatov M. A. 2000 : The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. J. Ichthyology, 40 Suppl., 2, pp. 232 – 261.

- Peter A., Mettler R., Schölzel N. 2016 : Kurzbericht zum Vorprojekt «PIT-Taggung Untersuchungen am Hochrhein – Kraftwerk Rheinfelden». Étude mandatée par l'Office fédéral de l'environnement, 43 p.
- Pitsch M., Mockenhaupt B. 2015 : Passierbarkeit in unterschiedlichen Abschnitten einer Fischaufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise. In : Bundesanstalt für Gewässerkunde (éd.): Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Massnahmen an Bundeswasserstrassen. 4. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstrassen am 9./10. Juli 2014 in Koblenz. – Veranstaltungen 01/2015, Coblenz, février 2015 : DOI 10.5675/BfG_Veranst_2015.1, pp. 105 – 111.
- Rajaratnam N., Van der Vinne G., Katopolis C. 1986 : Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 10, pp. 909 – 927.
- Ratschan C., Jung M., Zauner G. 2017 : Fischaufstiegs-schnecken: Funktionsfähigkeit und Eignung für unterschiedliche Standorte zum gegenwärtigen Wissensstand. *Oberösterreichische Umwelthanwaltschaft*, 57 p.
- Redeker M., Heimerl S. 2018 : Improved Fish Pass Entrance Design Involving Surplus Attraction Flow. *International Symposium on Hydraulic Structures*. 9.
- Schmalz W. 2010 : Untersuchungen zum Fischabstieg und Kontrolle möglicher Fischschäden durch die Wasserkraftschnecke an der Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra in Meiningen. Abschlussbericht. Breitenbach.
- Schneider J. 2009 : Ökologische Vorgaben für Sohlgleiten. In : DWA (éd.), *Naturnahe Sohlgleiten*. DWA, Hennef, pp. 29 – 49.
- Schneider J. 2017 : Untersuchung des Potenzials von Fischtransporten von Rhinau zum Restrhein und der Schweiz – Fang-Transport. Gutachterliche Bewertung dreier vom französischen Ministerium für Umwelt, Energie und das Meer an die IKSR übergebenen Studien zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit des Oberrheins für Wanderfische. Studie im Auftrag der Niederlande, Luxemburgs, Deutschlands, Liechtensteins, der Schweiz und Österreichs vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit der Bundesrepublik Deutschland (AZ: WR I 4 – 20201-1/11), Francfort-sur-le-Main, 96 p.
- Schneider J., Hübner D. 2014 : Funktionskontrolle der Fischwechselanlagen am Main-Kraftwerk Kostheim. *Wasserwirtschaft*, 7/8, pp. 54 – 59.
- Schwevers U., Adam B. 2020 : Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer, 279 p.
- Schwevers U., Adam B., Dersch F., Goepfert S., Mögeltönder-Löwenberg S. 2019 : PIT-Taggung Hochrhein. Abschlussbericht im Auftrag des eidgenössischen Bundesamtes für Umwelt, 172 p.
- Seidel F., Schultz P., Stadler C., Riedelbauch S. Nestmann F. 2017 : Baden-Württembergisches Forschungsprojekt Wasserkraftschnecken und Fischabstieg. *Wasserwirtschaft* 10, pp. 24 – 28.
- Seifert K. 2012 : Fischaufstiegsanlagen in Bayern, 150 p.
- Seifert K. 2016 : Praxishandbuch Fischaufstiegsanlagen in Bayern – Hinweise und Empfehlungen zu Planung, Bau und Betrieb. Landesfischereiverband Bayern e.V. et Bayerisches Landesamt für Umwelt (éd.), 2^e édition révisée, 152 p.
- Silva A., Lucas M. C., Castro-Santo, T., Katopodis C., Baumgartner L. J., Thiem J. D., Aarestrup K., Pompeu P. S., O'Brien G. C., Braun D. C., Burnett N. J., Zhu D. Z., Fjeldstad H.-P., Forseth T., Rajaratnam N., Williams J. G., Cooke S. J. 2017 : The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19, pp. 340 – 362.
- Sindelar C. 2011 : Design of a Meandering Ramp. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Technische Universität Graz, 242 p.
- Späh H. 2001 : Fischereibiologische Gutachten zur Fischverträglichkeit der Patent-geschützten Was-

- serkraftschnecke der RITZ-ATRO Pumpenwerksbau GmbH. Expertise non publiée.
- Stamm J., Helbig U. 2015 : Rundbeckenpass – Funktionsweise, Beispiele, Perspektiven. Bundesanstalt für Gewässerkunde (éd.): Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Massnahmen an Bundeswasserstrassen. 4. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstrassen am 9./10. Juli 2014 in Koblenz. – Veranstaltungen 1/2015, Coblenz, février 2015, pp. 112 – 117.
- Tudorache C., Viaene P., Blust R., Vereecken H., De Boeck G. 2008 : A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fish*, 17, pp. 284 – 291.
- Tummers J. S., Hudson S., Lucas M. C. 2016 : Evaluating the effectiveness of restoring longitudinal connectivity for stream fish communities: towards a more holistic approach. *Science of the total environment*, 569-570, pp. 850 – 860.
- Turnpenny A. W. H., Struthers G, Hanson K. P. 1998 : A UK guide to intake fish-screening regulations, policy and best practice, Londres (Crown), 127 p.
- USBR (United States Bureau of Reclamation) 2006 : Fish protection at water diversions. A guide for planning and designing fish exclusion facilities. *Water Resources Technical Publication*. U.S. Department of the Interior, 480 p.
- USFWS 2019 : Fish passage Engineering design criteria. U.S. Fish and Wildlife Service, Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts, 241 p.
- Van Esch M. 2015 : Model-based study of fish damage for the Pentair Fairbanks Nijhuis Modified Bulb Turbine and the Water2Energy Cross Flow turbine. *Pro-Tide Report Version 31-8-2015*.
- VAW 2021 : Fischleitreechen Pilotanlage KW Herrentöbeli – Hydraulische und numerische Modelluntersuchung zur Anordnung eines Curved-Bar Rack Bypass-Systems beim Kraftwerk Herrentöbeli an der Thur. St.Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG, VAW 4394, 119 p. + annexes.
- Vogel B. 2017 : Auf der Suche nach dem optimalen Rechen. *Wasser Energie Luft* 4/2017, pp. 247 – 250.
- Vogel B. 2017 : Wasserkraft: Die Suche nach dem besten Rechen. *Umweltperspektiven*, édition d'octobre 2017, 5 p.
- Wagner F. 2017 : Vergleichende Analyse des Fischabstiegs an drei Wasserkraftanlagen einer Kraftwerkskette. In : Heimerl, S., *Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern*. Springer, pp. 592 – 602.
- Wagner T., Ulrich J., R. Hezel R. 2017 : Analyse von Studien zu möglichen Fischschäden an Wasserkraftschnecken. *WasserWirtschaft* 9, pp. 42 – 46.
- Wang, R. W., David, L., Larinier, M. 2010 : Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, n° 396.
- Weichert R., Heneka P., Henning M. 2018 : Hydraulische Methoden zur Auslegung der Leitströmung einer Fischaufstiegsanlage. 7. Informations- und Erfahrungsaustausch – Sanierung Fischgängigkeit Wasser-Agenda 21, Zurich.
- Weichert R., Kampke W., Deutsch L., Scholten M. 2013 : Zur Frage der Dotationswassermenge von Fischaufstiegsanlagen an großen Fließgewässern. *WasserWirtschaft* 103(1-2), p. 33 – 38.
- Weichert R., Thorenz C. 2017 : Fischabstieg an Wehranlagen – gefahrlos oder kritisch? Kolloquium Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstrassen. Bundesanstalt für Wasserbau, pp. 41 – 48.
- Williams J. G., Armstrong G., Katopodis C., Larinier M., Travade F. 2012 : Thinking like a fish : A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications* 28 (4), pp. 407 – 417.
- Wolfram G. 2015 : Bewertung der Fischaufstiegshilfe Lafnitz aus gewässerökologischer Sicht, 21 p.

Wolter C., Schomaker C. 2019 : Fish passes design discharge requirements for successful operation. River Research and Applications, pp. 1 – 5.

Wüst S., Weibel U. 2020 : Telemetrie in der Barbenregion – Verhindert elektrische Fischechanlage Sackgasseneffekt? WasserWirtschaft (2-3), pp. 49 – 54.

Zaugg C., Dönni W., Boller L., Guthruf J. 2017 : Massnahmenumsetzung Sanierung Fischgängigkeit. Handbuch Wirkungskontrollen. Office fédéral de l'environnement, 82 p.

Zaugg, C., Mendez, R. 2018 : Kleinwasserkraftwerk Stroppel. Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass. Axpo Kleinwasserkraft AG, 104 p.

Zauner G., Ratschan C., Eberstaller J., Pinka P. 2005 : Vertical-Slot-Fischpass mit staffelbarem Abfluss: Eine Möglichkeit zur Optimierung von technischen Fischaufstiegshilfen. Österreichs Fischerei 58, pp. 162 – 169.

Zingg S. 2017 : WKW Laubegg, Lebendversuch Fischabstieg. WKW Laubegg, Einstellung Fischabstieg. BKW, 14 p.

Zingg S. 2017 : WKW Laubegg, Lebendversuch Fischabstieg. WKW Laubegg, Einstellung Fischabstieg. BKW, 14 p.

12 Glossaire

0+ Poisson

Poisson entre 0 et 1 an (classe d'âge)

1+ Poisson

Poisson entre 1 et 2 ans (classe d'âge)

Bief amont

Zone du cours d'eau située en amont de l'ouvrage transversal

Bief aval

Zone du cours d'eau située en aval de l'ouvrage transversal

By-pass

Connexion entre le bief amont et le bief aval d'un ouvrage visant à garantir la dévalaison des poissons en toute sécurité

Centrale au fil de l'eau

Centrale qui utilise, à des fins de production d'énergie, l'eau d'un cours d'eau endigué grâce à un ouvrage transversal sans retenue

Centrale avec dérivation

Centrale hydroélectrique qui utilise l'eau dérivée d'un cours d'eau à des fins de production d'énergie. Un débit réduit (débit résiduel) s'écoule entre le point où l'eau est prélevée et celui où elle est restituée.

Couloir de migration

Espace dans lequel les poissons peuvent nager en amont ou en aval du cours d'eau en utilisant leur capacité de nage, leur masse corporelle et leur puissance de saut

Courant concurrentiel

Courant qui entre en concurrence avec le courant d'attrait et qui peut donc provoquer une mauvaise orientation des poissons

Courant de court-circuit

Parcours rectiligne du courant entre les ouvertures de deux cloisons ou rangées de blocs successives

Courant d'attrait

Courant généré à l'entrée de l'ouvrage de montaison pour guider les poissons dans le couloir de migration

Cyprinidés

Famille de poissons à laquelle appartient par exemple le barbeau

Diadrome

Migration entre les eaux marines et les dulcicoles

Dissipation énergétique

Conversion, par friction, de l'énergie cinétique en d'autres formes d'énergie (p. ex. chaleur) dans le bassin d'un ouvrage de montaison notamment

Dotation supplémentaire

Quantité d'eau supplémentaire ajoutée pour créer un appel suffisant (courant d'attrait) dans la zone d'entrée d'un ouvrage de montaison

Embâcle

Bois ou autres matériaux accumulés dans le profil transversal du cours d'eau qui retiennent à leur tour bois mort, feuilles et sédiments et obstruent l'écoulement de l'eau

Entrée

Ouverture d'un ouvrage de montaison en aval de l'installation ou d'un ouvrage de dévalaison en amont de l'installation

Espèce cible

Espèce représentative d'un site qui répond le plus aux besoins d'autres groupes de poissons

Grille horizontale

Grille équipée de barres placées horizontalement par rapport au courant, désignée souvent par « grille oblique » ou « grille de guidage »

Grille verticale

Grille verticale droite : grille avec des barres verticales placées plus ou moins perpendiculairement au courant, souvent appelée « grille conventionnelle »

Grille verticale inclinée

grille inclinée verticalement en direction du courant, soit du lit (<45 °), avec des barres verticales, souvent appelée « grille plate »

Largeur de fente

Ouverture d'une cloison dans le cas d'une passe à poissons à fentes verticales

Limnophile

Espèce évitant le courant

Obstacle à la migration

Élément transversal d'un cours d'eau (p. ex. barrage ou chute) qui entrave ou empêche la libre migration des poissons

P₃₀ et P₃₃₀

Niveau de mesure dans le bief aval et amont des ouvrages de montaison : niveau (m s.m.) atteint ou dépassé respectivement 30 et 330 jours par an

Percidés

Famille de poissons à laquelle appartient par exemple la perche

Potamodrome

Migration entre des eaux dulcicoles

Puissance volumique dissipée

Puissance absorbée dans le volume d'un bassin en fonction du débit et de la hauteur du bassin ; mesure simplifiée de la turbulence dans un bassin

Q₃₀ et Q₃₃₀

Débit atteint ou dépassé respectivement 30 jours et 330 jours par an

Un débit peut être exprimé de deux manières : on considère soit les jours pendant lesquels le débit dépasse une certaine valeur (méthode principalement utilisée en Suisse) soit les jours pendant lesquels le débit n'atteint pas cette valeur (méthode principalement utilisée en Allemagne et en Autriche).

En Suisse, Q₃₀ correspond à la valeur (débit) qui, selon les statistiques, est atteinte ou dépassée en moyenne seulement 30 jours par an (débit de crues). En Allemagne et en Autriche, Q₃₃₅ correspond à la valeur (débit) qui, selon les statistiques, n'est en moyenne pas atteinte 335 jours par an. Ces deux méthodes renvoient au même débit. Ainsi, les désignations suisses Q₃₃₀ et Q₃₀ correspondent aux désignations allemandes et autrichiennes Q₃₅ et Q₃₃₅.

Pour éviter toute confusion inutile, les aides à la migration piscicole doivent fonctionner, comme c'est le cas jusqu'à présent, pour des débits compris entre Q₃₀ et Q₃₃₀, sachant que les valeurs de débit qui en découlent ne correspondent pas précisément aux recommandations de la DWA (2016).

Rhéophile

Espèce affectionnant le courant

Salmonidés

Famille de poissons à laquelle appartient le saumon et la truite

Sortie

Ouverture d'un ouvrage de montaison en amont de l'installation ou d'un ouvrage de dévalaison en aval de l'installation

Vitesse d'écoulement rhéoactive

Vitesse de l'écoulement à laquelle le poisson aligne l'axe longitudinal de son corps contre le courant

Zonation piscicole

Tronçon d'un cours d'eau peuplé par une ou plusieurs espèces de poissons en fonction de leur comportement reproducteur et de leurs exigences en matière de température de l'eau

13 Annexe

13.1 Best practice – exemples de montaison

Les centrales hydroélectriques présentées ci-après montrent à titre d'exemple comment concevoir la montaison des poissons. Le bon fonctionnement des ouvrages de franchissement a en partie été prouvé dans le cadre

du suivi des effets. Les centrales ne satisfont cependant pas toutes à l'ensemble des exigences mentionnées au chapitre 4. S'agissant des zones à truites, il manque des exemples de bon fonctionnement avéré qui pourraient servir de modèles du point de vue technique.

13.1.1 Rhin, centrale de Rheinfelden – ouvrage de montaison sur les deux rives

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Kraftwerk Rheinfelden
Exploitant	Energiedienst Holding AG
Lieu	Rheinfelden, Suisse / Allemagne
Coordonnées	2°628'145 / 1°268'730
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale au fil de l'eau
Largeur du cours d'eau	340 m
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 1651 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 523 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	1500 m^3/s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹²	9,1 m
Type de turbines	4 turbines Kaplan double réglage à groupe bulbe
Puissance	100 000 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive gauche
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à barbeaux
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Saumon
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Goujon, ablette
Principal couloir de migration	Sur les deux rives
Ouvrage de montaison	
Type de construction	Passe à fentes verticales en rive gauche ; cours d'eau de contournement avec trois entrées, en rive droite ; l'entrée la plus en amont se situe près du barrage et donne accès à une passe à bassins rugueux ; les deux autres entrées, plus en aval, donnent accès respectivement à une rampe et à un chenal rugueux.
Nombre d'entrées / emplacement	Passe à fentes verticales : une entrée en rive gauche. Cours d'eau de contournement : trois entrées en rive droite, dont une près du barrage et les deux autres à l'extrémité aval du cours d'eau de contournement.
Distance de l'entrée à l'obstacle	Passe à fentes verticales : 0 m Cours d'eau de contournement : 80 m, 800 m, 895 m
Angle du courant d'attrait par rapport au courant principal	Passe à fentes verticales : 0° Cours d'eau de contournement : env. 0° – 30°, 45° et 30°
Longueur totale	Passe à fentes verticales : env. 315 m Cours d'eau de contournement : 900 m

¹² Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

Nombre de bassins	Passe à fentes verticales : 61 Passe à bassins rugueux : 47
Liaison avec le fond du cours d'eau	Tous les couloirs de montaison présentent une liaison avec le fond du cours d'eau.
Caractéristiques du fond de l'ouvrage	Passe à fentes verticales : grosses pierres de roche très rugueuses Cours d'eau de contournement : fond graveleux Passe à bassins rugueux : grosses pierres de roche
Dotation	Dynamique Passe à fentes verticales : débit = 0,56 m ³ /s (+ 0,74 m ³ /s à 2.44 m ³ /s dotation supplémentaire) Cours d'eau de contournement : 10 – 30 m ³ /s (dont 0,6 m ³ /s pour la passe à bassins rugueux + 1,1 m ³ /s dotation supplémentaire par les by-pass)
Dimensions de bassin minimales, longueur libre x largeur libre	Passe à fentes verticales : longueur libre : 3,15 m, largeur libre : 2,3 m Cours d'eau de contournement : largeur libre : 60 m Passe à bassins rugueux : 2,5 m x 2,5 m
Largeur de fente minimale	Passe à fentes verticales : 0,3 m Passe à bassins rugueux : deux trous, resp. de 0,2 m et de 0,3 m
Différence de niveau maximale entre bassins	Passe à fentes verticales : 0,15 m Passe à bassins rugueux : 0,15 m
Vitesse d'écoulement maximale	Passe à fentes verticales : 1,7 m/s Cours d'eau de contournement : 1,4 m/s Rampe d'accès au cours d'eau de contournement : 1,75 m/s Passe à bassins rugueux : 1,75 m/s
Profondeur minimale	Passe à fentes verticales : 1,22 m Cours d'eau de contournement : 0,85 m Passe à bassins rugueux : 0,65 m
Remarques complémentaires	Le planificateur qualifie le cours d'eau de contournement de « cours d'eau proche de l'état naturel », car il le conçoit en premier lieu en tant qu'habitat de la faune aquatique et non comme couloir de montaison.

Évaluation / suivi des effets

Type de contrôle, bureau, rapport	Comptage coordonné des poissons en montaison dans le haut Rhin. Étude préliminaire par PIT-tag. Peter et al. 2016. Rapport final PIT-tag haut Rhin, Schwevers et al. 2019.
-----------------------------------	--

Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

La combinaison des techniques à Rheinfelden fonctionne bien. Le cours d'eau de contournement est destiné aux espèces à faible capacité de nage et la passe à fentes verticales, plutôt aux espèces rhéophiles, à forte capacité de nage. Toutefois, malgré la vitesse d'écoulement de 1,7 m/s au niveau de l'entrée de la passe à fentes verticales, les espèces à faible capacité de nage et les petits individus parviennent également à franchir la passe. De plus, bien que les fentes soient relativement étroites, il ne semble pas y avoir de sélection des poissons en fonction de leur taille par rapport au cours d'eau de contournement.

Possibilités d'amélioration

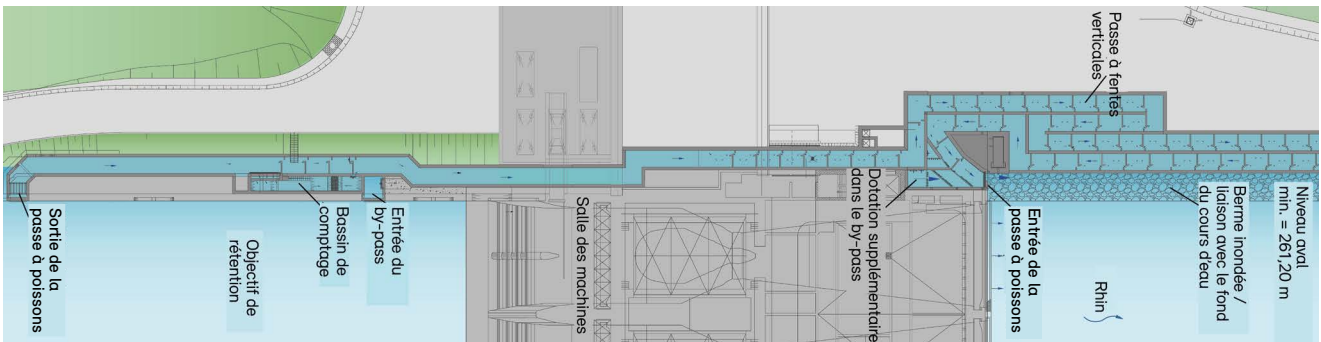
–

Fig. 55 : Aperçu des emplacements des ouvrages de montaison à la centrale de Rheinfelden, sur le Rhin



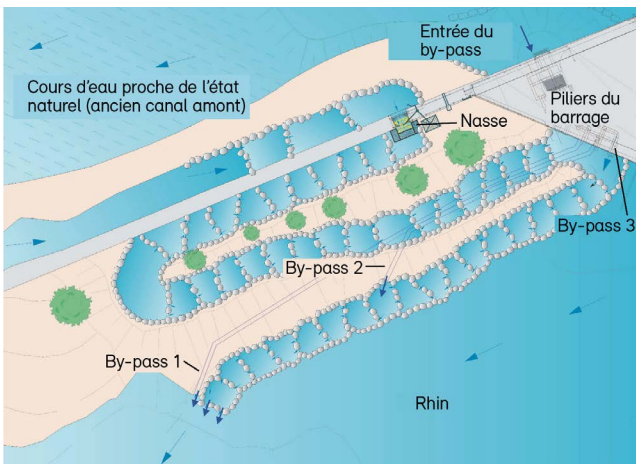
Source : données du canton d'Argovie, Office fédéral de topographie

Fig. 56 : Passe à fentes verticales



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 57 : Passe à bassins rugueux



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 58 : Passe à fentes verticales



Source : A. Peter

Fig. 59 : Passe à bassins rugueux



Source : A. Peter

13.1.2 Aar, centrale de la Matte – passe à bassins rugueux

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Schwellenmätteli
Exploitant	Energie Wasser Bern (ewb)
Lieu	Mattenschwelle à Berne, Suisse
Coordonnées	2°600'840 / 1°199'370
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale avec dérivation
Largeur du cours d'eau	40 à 50 m
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 229 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 46 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	40 m ³ /s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹³	1,5 m
Type de turbines	Groupe bulbe
Puissance	1150 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive gauche
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à ombres
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Barbeau, saumon
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Chabot
Principal couloir de migration	Rive droite
Ouvrage de montaison	
Type de construction	Passe à bassins rugueux
Nombre d'entrées / emplacement	Une entrée en rive droite
Distance de l'entrée à l'obstacle	5 m
Angle du courant d'attrait par rapport au courant principal	< 30°
Longueur totale	38 m
Nombre de bassins	19 (y c. bassin de comptage)
Liaison avec le fond du cours d'eau	Oui (bief amont et bief aval)
Caractéristiques du fond de l'ouvrage	Fond naturel
Dotation	0,7 m ³ /s + 0,8 m ³ /s débit du by-pass
Dimensions de bassin minimales, longueur libre x largeur libre	2,5 m x 2,4 m (partie amont) 4,5 m x 1,8 m (partie aval)
Largeur de fente minimale	0,25 m
Différence de niveau maximale entre bassins	0,175 m
Vitesse d'écoulement maximale	Dans l'ouvrage : 1,85 m/s À l'entrée : 1,8 m/s (rétention lors de Q_{30})
Profondeur minimale	0,8 m
Remarques complémentaires	Les vannes sont gérées en fonction des besoins du couloir principal de migration. Pour augmenter le courant d'attrait, le by-pass vient se jeter dans la zone d'entrée de la passe. L'ouvrage a été assaini en 2013 (agrandissement des bassins, etc.). Étant donné que l'ouvrage passe en dessous du restaurant, les travaux n'ont pas été effectués sur toute la longueur de la passe, raison pour laquelle une partie des bassins présentent toujours des dimensions insuffisantes pour permettre la migration du saumon.

¹³ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

Évaluation / suivi des effets

Type de contrôle, bureau, rapport	Suivi des effets de l'ouvrage de montaison à la centrale de la Matte, à Berne ; Aquatica GmbH (avant les travaux d'assainissement)
-----------------------------------	--

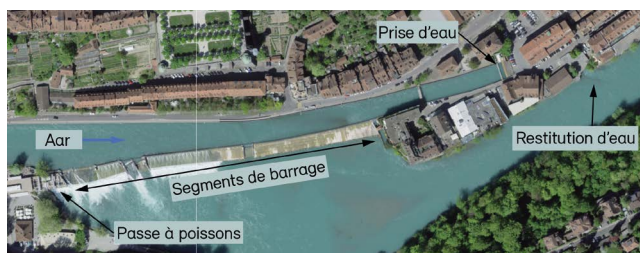
Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

Toutes les espèces cibles (ombre, truite de rivière, barbeau, chabot et spirin) franchissent l'obstacle. La proportion des espèces en montaison par rapport au total des espèces recensées dans le bief aval est relativement élevée (également en comparaison avec les autres ouvrages en Suisse). Le nombre de poissons empruntant la passe correspond à la moyenne enregistrée dans de nombreux autres ouvrages en Suisse. L'ouvrage de montaison de la Matte s'est révélé fort adapté à la montaison des petits poissons et des espèces à faible capacité de nage. Le nombre des grands poissons empruntant la passe est cependant resté faible.

Possibilités d'amélioration

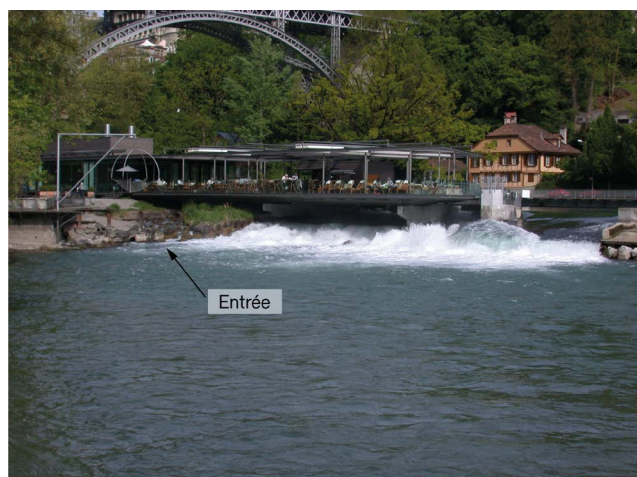
L'ouvrage de montaison n'est pas adapté à la migration du saumon. Par conséquent, il doit être assaini conformément à la planification du canton de Berne en application de la LEaux.

Fig. 60 : Aperçu de l'emplacement de l'ouvrage de montaison à la centrale de la Matte, sur l'Aar



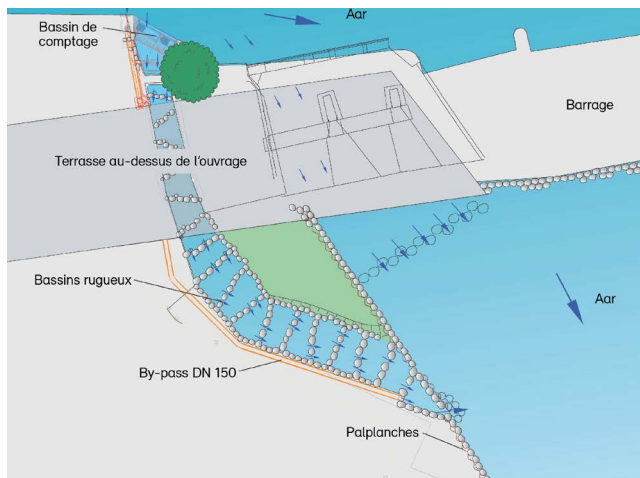
Source : autorités de la Confédération suisse

Fig. 62 : Entrée de la passe à bassins rugueux, vue dans le sens de la montaison



Source : W. Dönni

Fig. 61 : Schéma de l'ouvrage de montaison



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 63 : Barrage et bief aval



Source : W. Dönni

Fig. 64 : Passe à bassins rugueux



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

13.1.3 Moselle, centrale de Coblenz (barrage de la Moselle) – approche multiple pour la conception des entrées

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Moselstaustufe Koblenz
Exploitant	RWE Power AG
Lieu	Coblenz, Land de Rhénanie-Palatinat, Allemagne
Coordonnées	50° 36' 6.493" N / 7° 58' 2.438" E
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale au fil de l'eau
Largeur du cours d'eau	220 m, 290 m avec écluses
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 726 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	380 m^3/s (turbine de dotation 4,5 m^3/s)
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹⁴	6,0 m (selon le niveau de l'eau dans le bief aval)
Type de turbines	Centrale : 4 turbines Kaplan Turbine de dotation : turbine DIVE
Puissance	Centrale : 16 000 kW Turbine de dotation : 190 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive droite
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à barbeaux
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Barbeau, brème franche, saumon, grande alose
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Chabot, goujon, ablette
Principal couloir de migration	Rive droite
Ouvrage de montaison	
Type de construction	Passe à fentes verticales (entrées 1 + 2) ; rejoinement d'une autre passe à fentes verticales (aménagée en 2016, entrée 3)
Nombre d'entrées / emplacement	Trois entrées en rive droite
Distance de l'entrée à l'obstacle	Entrée 1 : 1 m Entrée 2 : 5 m Entrée 3 : 49 m
Angle du courant d'attrait par rapport au courant principal	Entrée 1 : courant d'attrait perpendiculaire au sens de l'écoulement Entrée 2 : courant d'attrait parallèle au mur de rive dans le <i>bief aval</i> , dans le sens de l'écoulement Entrée 3 : courant d'attrait parallèle à la berge, dans le sens de l'écoulement
Longueur totale	Passe à fentes verticales : 240 m Passe à fentes verticales provenant de l'entrée 3 : 27 m
Nombre de bassins	39
Liaison avec le fond du cours d'eau	Entrées 1 et 2 : non Entrée 3 : oui
Caractéristiques du fond de l'ouvrage	Pierres d'au moins 25 cm de diamètre
Dotation	Débits statiques Débit dans l'ouvrage de montaison = 0,77 m^3/s Dotation supplémentaire = env. 4,0 m^3/s par la turbine de dotation depuis le bief aval dans le bassin de l'entrée Débit total = env. 4,8 m^3/s , c.-à-d. 5 % du débit de la turbine proche de la berge
Dimensions de bassin minimales, longueur libre x largeur libre	3,8 m x 2,7 m
Largeur de fente minimale	0,45 m

¹⁴ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

Différence de niveau maximale entre bassins	0,15 m
Vitesse d'écoulement maximale	Fente : 1,71 m/s
Profondeur minimale	1,2 m
Remarques complémentaires	Fortes variations du niveau du bief aval. La hauteur des ouvertures d'entrée 1 et 2 est adaptée automatiquement en fonction du niveau aval afin que le courant d'attrait reste perceptible pour les poissons en toute circonstance.

Évaluation / suivi des effets

Type de contrôle, bureau, rapport	Bassin de comptage et compteurs VAKI (enregistrement vidéo)
-----------------------------------	---

Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

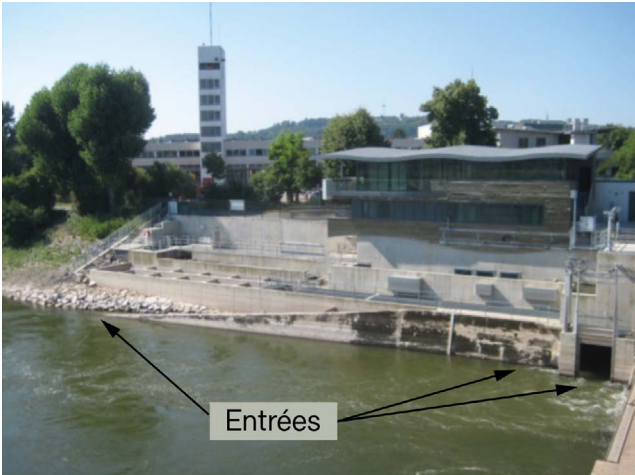
Un courant d'attrait est généré en surface et perpendiculairement à la centrale. Selon les conditions, il peut s'étendre sur toute la largeur de la centrale (entrée 1). Son ampleur dépend fortement du débit sortant des vannes. L'entrée 2 engendre un courant d'attrait le long du mur de rive qui guide les poissons directement dans la passe. L'entrée 3, quant à elle, crée un courant d'attrait efficace en particulier lorsque le niveau aval est bas.

L'évaluation des résultats du suivi biologique n'a pas encore été présentée.

Possibilités d'amélioration

Les entrées 1 et 2 ne sont pas reliées au fond du cours d'eau. Cependant, aménager une telle liaison n'est techniquement pas possible.

Fig. 65 : Trois entrées



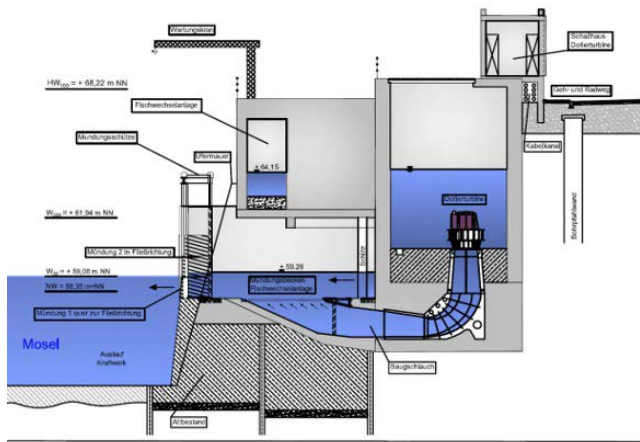
Source : SGD Nord, Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz Koblenz

Fig. 67 : Entrées 1 + 2



Source : SGD Nord, Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz Koblenz

Fig. 66 : Turbine de dotation



Querschnitt Dotierturbine und Mündung Fischwechsellage

Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 68 : Entrée 3



Source : SGD Nord, Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz Koblenz

13.1.4 Gadmerwasser, bassin de compensation de Fuhren – ascenseur à poissons

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Ausgleichsbecken Fuhren
Exploitant	Kraftwerke Oberhasli AG (KWO)
Lieu	Fuhren, Innertkirchen, canton de Berne, Suisse
Coordonnées	2'668'873 / 1'175'951
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale avec dérivation, y c. bassin de compensation
Largeur du cours d'eau	env. 12 m
Valeurs de débit caractéristiques	Les débits Q_{30} et Q_{330} ne sont pas pertinents, car il n'y a pas de corrélation entre ceux-ci et les niveaux d'eau du bief amont.
Débit d'équipement	2 m ³ /s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹⁵	5,75 m
Type de turbines	Pelton
Puissance	3400 kW en moyenne (30 GWh/a)
Emplacement de la salle des machines	Galerie de dérivation en rive gauche
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone supérieure de la truite
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Truite de rivière (valeur de dimensionnement = 40 cm)
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Truite de rivière
Principal couloir de migration	Sur toute la largeur
Ouvrage de montaison	
Type de construction	Ascenseur à poissons. Toboggan vers le bief amont. Accès par une passe à fentes verticales.
Nombre d'entrées / emplacement	Une entrée en rive gauche
Distance de l'entrée à l'obstacle	15 m
Angle du courant d'attrait par rapport au courant principal	0° La totalité du débit résiduel (= courant principal) est restituée au cours d'eau (Gadmerwasser) avec le même angle. La dotation du débit résiduel se fait par trois systèmes : écoulement par l'ascenseur à poissons et la passe à fentes verticales, écoulement par l'ouvrage de dévalaison et écoulement par l'installation de dotation estivale. Afin de créer un fort courant d'attrait, l'eau de l'ouvrage de dévalaison et de l'installation de dotation estivale est introduite à proximité immédiate de l'entrée de la passe à fentes verticales.
Longueur totale	Passe à fentes verticales : 16,5 m
Nombre de bassins dans la passe à fentes verticales	11
Liaison avec le fond du cours d'eau à l'entrée / à la sortie	Entrée de la passe à fentes verticales : oui Entrée de la cuve de transport : non Sortie du toboggan : non
Caractéristiques du fond de l'ouvrage	Couche de substrat de 20 cm d'épaisseur
Dotation	D'octobre à avril : 0,06 m ³ /s ; de mai à septembre : 0,06 m ³ /s + 0,15 m ³ /s dotation. La totalité du débit résiduel s'écoule par les ouvrages de montaison et de dévalaison.
Dimensions de bassin minimales, longueur libre x largeur libre	Passe à fentes verticales : 1,28 m x 0,96 m (la longueur des cloisons peut être adaptée pour modifier la largeur de la fente en fonction de la dotation). Cuve de transport de l'ascenseur à poissons : 1,2 m x 0,9 m
Largeur de fente minimale	0,16 m
Différence de niveau maximale entre bassins	0,05 m
Vitesse d'écoulement maximale	Passe à fentes verticales : 0,7 m/s à 1,0 m/s (dans la fente)

¹⁵ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

Profondeur minimale	<p>Passerelle à fentes verticales : 0,4 m</p> <p>Cuve de transport de l'ascenseur à poissons : phase de piégeage 0,5 m, ascension env. 0,2 m</p>
Remarques complémentaires	<p>Le niveau d'eau peut varier de 2 m dans le bassin de compensation.</p> <p>Les barres verticales de la grille qui referme l'ascenseur sont espacées de 20 mm. La cuve de transport se compose d'une cuve en métal dont les parois présentent une hauteur de 35 cm et sont surmontées d'une grille à barres verticales espacées de 20 mm.</p> <p>La cuve repose sur des pilotis durant la phase de piégeage afin que les truites de rivière juvéniles ne se fassent pas écraser lors de la descente de la cuve.</p> <p>Toboggan : longueur 19 m, pente 7,3 %, dotation de vidange 0,02 m³/s</p> <p>Exploitation de l'ascenseur : entre 4 et 12 ascensions par jour, en fonction de la saison.</p>
Évaluation / suivi des effets	
Type de contrôle, bureau, rapport	<p>Recensement des poissons par Peter Büsser avant la réalisation de l'ouvrage.</p> <p>Pour le monitoring ichtyo-écologique, des photos ont été prises pendant trois ans (de 2013 à 2015) lors de l'ascension de la cuve de transport. Les images ont été évaluées par le service spécialisé en matière d'écologie aquatique de la société KWO, de concert avec l'Inspection de la pêche du canton de Berne.</p> <p>Le comportement des poissons lors de l'accès à la cuve de transport a été analysé au début de l'été 2016 au moyen d'une caméra installée dans la passerelle à fentes verticales.</p> <p>Meyer et al. 2016 ; Meyer et al. 2017.</p>

Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

L'ouvrage de montaison fonctionne de manière fiable et ne nécessite que peu d'entretien, étant donné qu'il n'est pas directement relié au bief amont.

Le monitoring au moyen de la caméra braquée sur la cuve de transport a permis d'établir que l'ouvrage n'opérait pas de sélection des poissons en fonction de leur taille en ce qui concerne l'espèce cible. Le rapport entre le nombre d'individus qui franchissent l'obstacle et la population de truites de rivière est bon.

Presque tous les individus repérés ont accédé directement, sans retard, à la cuve de transport. Si certaines truites ont fait demi-tour et ont quitté la cuve, elles ont rapidement retrouvé la bonne direction et sont retournées dans l'ascenseur. Il n'y a pas de signes indiquant que la vitesse d'écoulement ou des turbulences poseraient un quelconque problème pour l'espèce cible sur le site étudié.

Possibilités d'amélioration

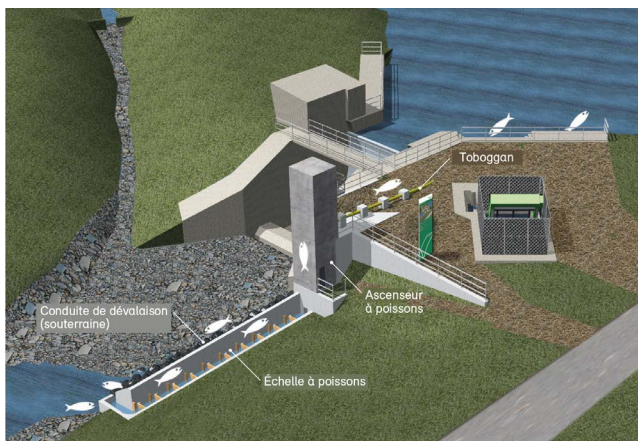
Ascenseur automatisé

L'ascenseur est équipé d'une minuterie et fonctionne selon un cycle défini, qui peut être adapté au besoin. Un système de comptage automatisé installé à l'entrée de l'ascenseur ou au niveau du goulet anti-retour pourrait mettre en marche le dispositif dès que le nombre de poissons défini est atteint. Étant donné que l'ascension de la cuve de transport et son déversement ne dure que quelques minutes, la migration piscicole serait ainsi quasiment ininterrompue.

Optimisation de la cuve de transport et de sa construction

Si un tel système est prévu dans un cours d'eau dont les espèces cibles présentent une faible capacité de nage, il est judicieux de concevoir le fond de la cuve de la manière la plus naturelle possible.

Fig. 69 : Schéma de l'ouvrage de montaison installé au bassin de compensation de Fuhren, Gadmerwasser



Source : M. Stähli, B. Kehrlí

Fig. 70 : Ascenseur à poissons



Source : M. Meyer

Fig. 71 : Zone d'entrée



Source : M. Meyer

Fig. 72 : Cuve de transport avec écoulement atténué



Source : M. Meyer

Fig. 73 : Sortie d'une truite de rivière dans le bassin de compensation



Source : M. Meyer

13.1.5 Rhin, centrale de Reichenau – dotation supplémentaire dans la passe à fentes verticales

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Stauwehr Reichenau, Alpenrhein
Exploitant	Kraftwerke Reichenau AG – KW Reichenau AG
Lieu	Domat/Ems, canton des Grisons, Suisse
Coordonnées	2°752'248 / 1°188'992
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale avec dérivation
Largeur du cours d'eau	60 m
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 41 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	120 m^3/s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹⁶	12 m
Type de turbines	2 turbines Kaplan
Puissance	28 000 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive droite
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à ombres
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Truite lacustre
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Chabot
Principal couloir de migration	Rive gauche
Ouvrage de montaison	
Type de construction	Passe à fentes verticales
Nombre d'entrées / emplacement	Une entrée en rive gauche
Distance de l'entrée à l'obstacle	20 m
Angle du courant d'attrait par rapport au courant principal	Env. 45°
Longueur totale	185 m
Nombre de bassins	56
Liaison avec le fond du cours d'eau	Oui
Caractéristiques du fond de l'ouvrage	Gravier grossier et cailloux (3 à 15 cm), bétonnés. Épaisseur variable, env. 5 à 15 cm.
Dotation	Débit par la passe à fentes verticales : 0,525 – 0,6 Dotation supplémentaire : 2,4 dans le bassin le plus en aval
Dimensions de bassin minimales, longueur libre x largeur libre	3,0 m x 2,1 m
Largeur de fente minimale	0,3 m
Différence de niveau maximale entre bassins	0,2 m
Vitesse d'écoulement maximale	1,7 m/s
Profondeur minimale	1,0 m
Remarques complémentaires	L'orifice de sortie de la turbine de dotation se situe dans le bassin le plus en aval de la passe. L'installation d'une grille de guidage sur cet orifice attire les poissons dans la zone à écoulement atténué située au-dessus de l'orifice, où se trouve latéralement la fente menant au deuxième bassin de l'ouvrage de montaison.

¹⁶ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

Évaluation / suivi des effets

Type de contrôle, bureau, rapport

Comptage des poissons en montaison au moyen d'une nasse (2000 – 2007), d'une caméra (2007 – 2016) et du système automatique « Riverwatcher » (VAKI ; depuis 2017). Rapports annuels « Fischaufstieg Kraftwerk Reichenau », canton des Grisons.

Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

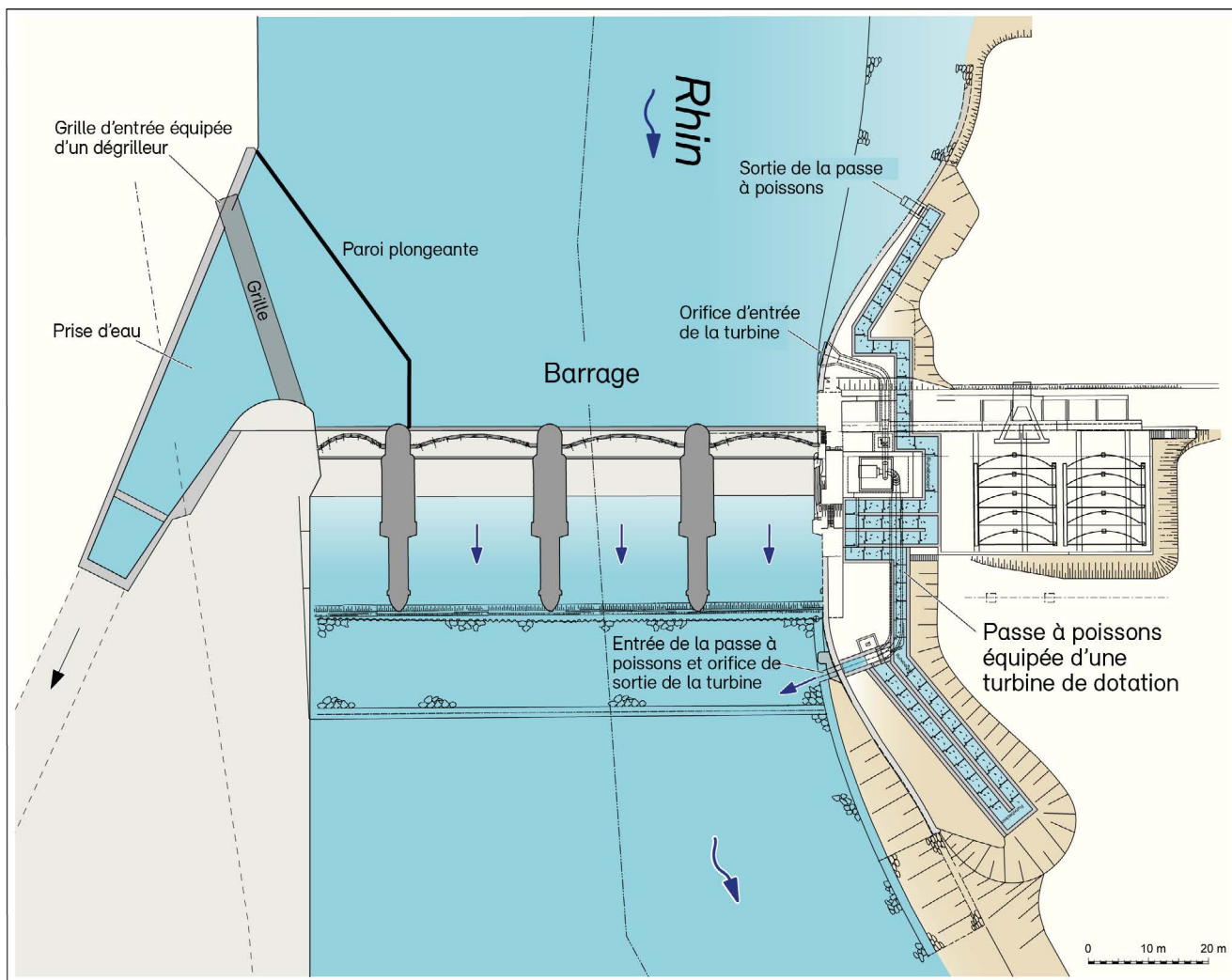
Des chabots ont été observés dans l'ouvrage de montaison, ce qui indique que même des poissons benthiques, à faible capacité de nage, empruntent la passe. Le nombre de truites lacustres en montaison est jugé positif.

S'agissant de la repérabilité à distance de l'entrée, aucune étude spécifique n'a été menée. Les poissons doivent accéder au tronçon à débit résiduel (3 m³/s) environ 1,3 km en aval de l'ouvrage de montaison. Le débit de ce tronçon est en concurrence avec celui en aval de la centrale, qui est de l'ordre de 120 m³/s.

Possibilités d'amélioration

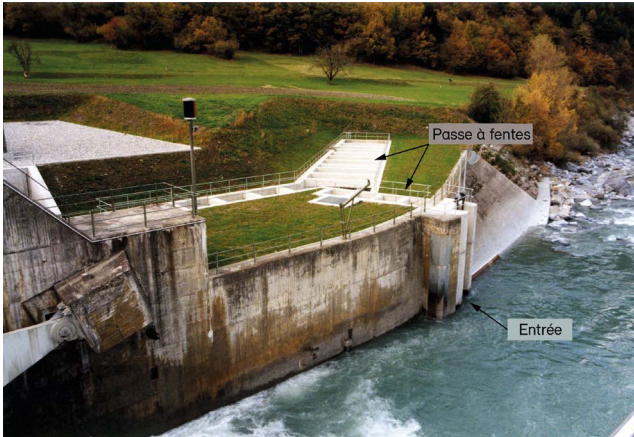
-

Fig. 74 : Aperçu de la centrale de Reichenau, Rhin



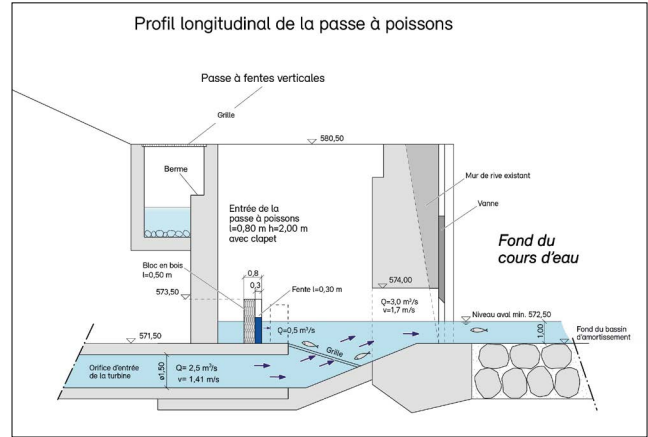
Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 75 : Entrée de la passe à fentes verticales



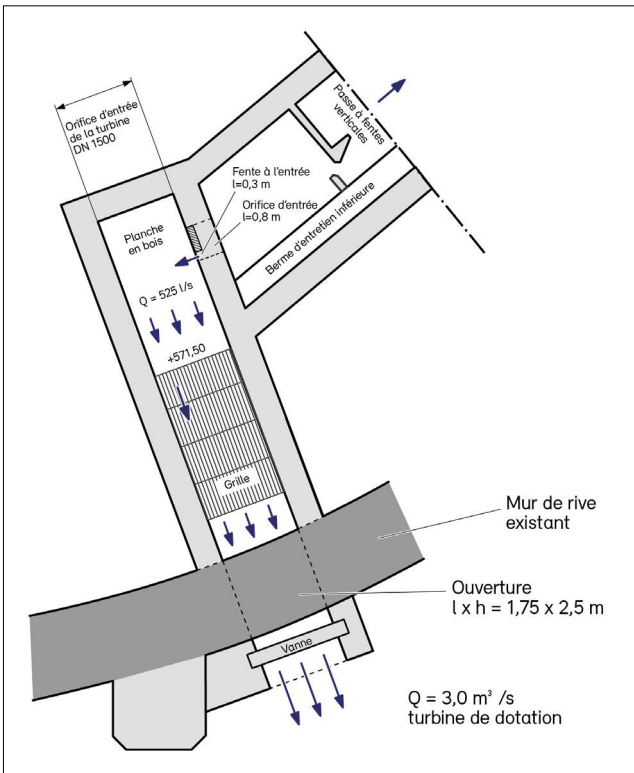
Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 77 : Profil longitudinal de la sortie de la turbine de dotation



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

Fig. 76 : Vue verticale sur la sortie de la turbine de dotation



Source : bureau d'ingénieurs Dr. Gebler GmbH

13.2 Best practice – exemples de dévalaison

Les centrales hydroélectriques présentées ci-après montrent à titre d'exemple comment concevoir la dévalaison des poissons. Le bon fonctionnement des ouvrages de franchissement a été prouvé, en partie, dans le cadre du suivi des effets. Les centrales ne satisfont cependant pas toutes à l'ensemble des exigences mentionnées au chapitre 5.

13.1.2 Limmat, centrale de Stoppel – grille horizontale avec by-pass

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Kleinwasserkraftwerk Stoppel
Exploitant	Axpo Kleinwasserkraft AG
Lieu	Untersiggenthal, canton d'Argovie, Suisse
Coordonnées	2°660'374 / 1°261'627
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale avec dérivation
Largeur du cours d'eau	15 m (canal d'amenée)
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 33 \text{ m}^3/\text{s}$ canal d'amenée ; $170 \text{ m}^3/\text{s}$ Limmat Baden / $Q_{330} = 33 \text{ m}^3/\text{s}$ canal d'amenée ; $46 \text{ m}^3/\text{s}$ Limmat Baden
Débit d'équipement	$33 \text{ m}^3/\text{s}$
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ¹⁷	3,2 m
Type de turbines	1 turbine Francis, 2 turbines Kaplan
Puissance	840 kW
Emplacement de la salle des machines	Tout le profil transversal
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à ombres / à barbeaux
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Barbeau (60 à 80 cm)
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Toutes les espèces dès 0+
Ouvrage de dévalaison	
Type de construction	Grille horizontale et by-pass
Type de grille	Grille horizontale
Espacement libre des barres de la grille	20 mm
Longueur de la grille	25,5 m
Vitesse d'approche maximale à la grille ¹⁸	$\leq 0,48 \text{ m/s}$
Angle de la grille	Angle d'incidence horizontal : 38°
Emplacement de l'entrée du by-pass	À l'extrémité aval de la grille
Type d'entrée du by-pass	Profil en forme de puits et vanne en aval avec orifice d'entrée relié au fond et à la surface
Dotation	Exploitation normale $0,69 \text{ m}^3/\text{s}$ (2 % du débit d'équipement), augmentation en cas de débits/niveaux du bief amont élevés
Dimensions des profils d'entrée : largeur libre x hauteur libre de l'entrée	Orifice d'entrée au fond : $0,6 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ Orifice d'entrée à la surface : $0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$

¹⁷ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

¹⁸ Vitesse normale pour le débit maximal pertinent

Profondeur minimale à l'orifice de l'ouvrage de dévalaison ¹⁹	2,29 m pour Q ₃₄₇
Goulot d'étranglement du by-pass, largeur libre x hauteur libre	Conduite en acier de 1 m de diamètre
Coude du by-pass	Oui (2 coudes à 45° pour contourner des éléments d'installation)
Type de by-pass	Chenal rectangulaire et conduite (tous deux à écoulement libre)
Hauteur de chute entre la sortie et le bief aval	0,4 m immédiatement après le clapet destiné à une dévalaison proche de la surface ; de 0 m à 1,0 m au déversement dans le canal de restitution (selon le niveau du canal)
Vitesse d'écoulement à l'entrée	0,9 m/s, accélération en aval
Dévalaison / ouverture des vannes	Barrage non régulé
Pente du by-pass	Max. 9 % En moyenne 5 %
Profondeur minimale du bassin d'amortissement en aval des vannes ou du by-pass	Min. 2,6 m pour Q ₃₄₇ immédiatement après le clapet destiné à une dévalaison proche de la surface ; min. 1,5 m dans le canal de restitution (selon le niveau du canal)
Remarques complémentaires	Gouttière de guidage au pied de la grille (largeur x hauteur = 0,6 m x 0,5 m). Après la vanne se trouve un seuil à surverse pour garantir une profondeur suffisante après l'entrée et éviter des conditions hydrauliques défavorables.

Évaluation / suivi des effets

Type de contrôle, bureau, rapport	Suivi biologique au moyen d'une nasse à poissons installée à la sortie du by-pass, surveillance vidéo devant la grille, images au moyen d'une caméra acoustique Didson devant et derrière la grille (Zaugg & Mendez 2018)
-----------------------------------	---

Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité

Du fait de leur taille, environ 90 % des poissons en dévalaison auraient pu franchir la grille. Or seul un petit nombre de petits poissons a été enregistré derrière la grille (env. 1,6 à 3,2 % de tous les poissons en dévalaison en l'espace de deux jours et demi). Par conséquent, la fonction de guidage et de protection de la grille peut être jugée bonne. Le nombre élevé de poissons franchissant l'ouvrage de dévalaison ainsi que les enregistrements vidéo permettent d'affirmer que les poissons trouvent les entrées du by-pass facilement sans perdre de temps. Les enregistrements vidéo montrent par ailleurs que les petits poissons résistent au débit et séjournent relativement longtemps devant la grille. Des blessures dues à la trajectoire du by-pass ont été constatées sur des petits poissons. Selon toute vraisemblance, les rayons des coudes, conjugués à des vitesses d'écoulement élevées de 4 à 5 m/s, en sont à l'origine.

Possibilités d'amélioration

Des examens sont en cours pour évaluer la nécessité de rectifier la trajectoire du by-pass (état : août 2018).

Fig. 78 : Aperçu de la centrale de Stroppe, sur la Limmat, avec l'ouvrage de dévalaison



Source : Axp0, image de fond : autorités de la Confédération suisse

¹⁹ À l'entrée du by-pass

Fig. 79 : Grille horizontale avec gouttière collectrice



Source : Axpo

Fig. 80 : Sortie du by-pass



Source : Axpo

Fig. 81 : Nasse à poissons pour le suivi biologique



Source : Axpo

Fig. 82 : Mise en place de la nasse et d'une plate-forme pour le suivi biologique



Source : Axpo

13.2.1 Saale, centrale de Planena – grille horizontale avec by-pass

Cours d'eau / ouvrage transversal	
Désignation	Halle-Planena
Exploitant	Wasserkraftanlage Planena GmbH & Co. KG
Lieu	Halle-sur-Saale, Land de Saxe-Anhalt, Allemagne
Coordonnées	51°25'00.47" N / 11°57'11.03" E
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale au fil de l'eau
Largeur du cours d'eau	60 à 80 m
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{50} = 131 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 26,7 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	50 m ³ /s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ²⁰	2,36 m pour débit (Q) moyen
Type de turbines	2 turbines Kaplan
Puissance	1200 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive droite
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à barbeaux
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Barbeau
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Smolt (saumon, truite de mer), anguille
Ouvrage de dévalaison	
Type de construction	Grille horizontale et by-pass
Type de grille	Grille horizontale
Espacement libre des barres de la grille	20 mm
Longueur de la grille	29,5 m
Vitesse d'approche maximale à la grille ²¹	0,45 m/s
Angle de la grille	Angle d'incidence horizontal : $\geq 45^\circ$
Emplacement de l'entrée du by-pass	À l'extrémité aval de la grille
Type d'entrée du by-pass	Sur toute la profondeur d'eau
Dotation	1,0 m ³ /s, soit $\geq 2\%$ du débit turbiné
Dimensions des profils d'entrée : largeur libre x hauteur libre de l'entrée	Profil d'entrée : 1 m x 4,03 m
Profondeur minimale à l'orifice de l'ouvrage de dévalaison ²²	4,03 m
Goulot d'étranglement du by-pass, largeur libre x hauteur libre	Vanne de régulation pivotable : 0,3 m x 0,5 m (fond) / 0,3 m x $\geq 0,63$ m (surface)
Coude du by-pass	Oui, un changement de direction d'env. 13°
Type de by-pass	Chenal rectangulaire à écoulement libre
Hauteur de chute entre la sortie et le bief aval	$\leq 1,62$ m
Vitesse d'écoulement dans la zone d'entrée du by-pass	0,0 m/s à 3,9 m/s (variable selon l'emplacement dans le profil transversal, accélération à proximité du clapet du by-pass)
Dévalaison / ouverture des vannes	En cas de dépassement du débit d'équipement, les poissons passent davantage par la vanne à mesure que celle-ci s'ouvre.
Pente du by-pass	1:58, soit 1,7 % (baisse continue)

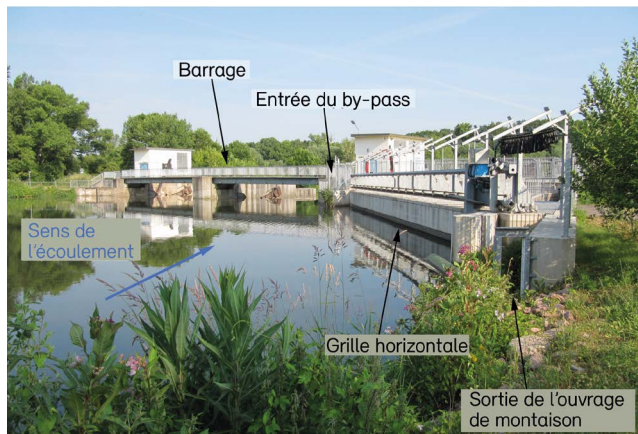
²⁰ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

²¹ Vitesse normale pour le débit maximal pertinent

²² À l'entrée du by-pass

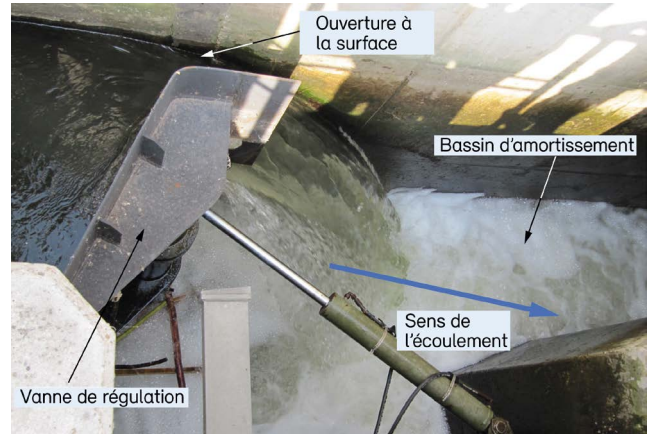
Profondeur minimale du bassin d'amortissement en aval des vannes ou du by-pass	1,30 m
Remarques complémentaires	Perte de charge au niveau de la grille en phase d'exploitation : ≤ 2 cm
Évaluation / suivi des effets	
Type de contrôle, bureau, rapport	Suivi des effets réalisé par G. Ebel (BGF)
<p>Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité D'après Dönni & Boller (2011), les suivis des effets attestent le fonctionnement impeccable du système grille-by-pass. Aucune sélection des poissons en fonction de leur taille n'a été observée. En effet, la longueur des poissons ayant franchi le by-pass va de 5 cm (petit juvénile) à 1,3 m (silure glâne). Presque toutes les espèces et classes d'âge ont emprunté le by-pass. Tant des espèces benthiques que des espèces migrant près de la surface ont été détectées.</p>	
<p>Possibilités d'amélioration -</p>	

Fig. 83 : Aperçu de l'ouvrage de dévalaison à la centrale de Planena, sur la Saale



Source : W. Dönni

Fig. 85 : By-pass équipé d'une vanne de purge



Source : W. Dönni

Fig. 84 : Grille horizontale



Source : W. Dönni

13.2.2 Simme, centrale de Laubegg – ouvrage de dévalaison en zone à truites

Gewässer / Querbauwerk	
Désignation	Kraftwerk Laubegg
Exploitant	BKW
Lieu	Boltigen, canton de Berne, Suisse
Coordonnées	2°59'587 / 1°15'645
Type d'exploitation de la force hydraulique	Centrale avec dérivation
Largeur du cours d'eau	env. 15 m
Valeurs de débit caractéristiques	$Q_{30} = 18 \text{ m}^3/\text{s}$ / $Q_{330} = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit d'équipement	12 m ³ /s
Hauteur de chute de l'ouvrage transversal ²³	env. 4,5 m
Type de turbines	Turbine bulbe « S »
Puissance	2600 kW
Emplacement de la salle des machines	Rive gauche
Faune piscicole	
Zonation piscicole	Zone à truites
Plus grande(s) espèce(s) de poissons	Truite de rivière
Plus petite(s) espèce(s) de poissons	Truite de rivière
Ouvrage de dévalaison	
Type de construction	Grille verticale, à surverse
Type de grille	Grille verticale
Espacement libre des barres de la grille	20 mm
Longueur de la grille	5,8 m
Vitesse d'approche maximale à la grille ²⁴	0,75 m/s
Angle de la grille	Angle d'inclinaison vertical : 15°
Emplacement de l'entrée du by-pass	À droite de la grille à surverse
Type d'entrée du by-pass	Proche de la surface
Dotation	By-pass : 0,08 m ³ /s (0,7 % du débit d'équipement) Débit par la vanne : 0,92 m ³ /s
Dimensions des profils d'entrée : largeur libre x hauteur libre de l'entrée	0,6 m x env. 0,5 m
Profondeur minimale à l'orifice de l'ouvrage de dévalaison ²⁵	env. 0,2 m
Goulot d'étranglement du by-pass, largeur libre x hauteur libre	Conduite DN 500 (diamètre extérieur 0,5 m)
Coude du by-pass	Oui (90°, ensuite chute dans le puits et conduite de dévalaison jusqu'à l'orifice de sortie)
Type de by-pass	Chenal rectangulaire ouvert, puis conduite
Hauteur de chute entre la sortie et le bief aval	env. 2 m
Vitesse d'écoulement à l'entrée	0,75 m/s
Dévalaison / ouverture des vannes	À gauche du barrage, largeur env. 0,8 m, profondeur d'eau env. 0,1 m
Pente du by-pass	Env. 1 %

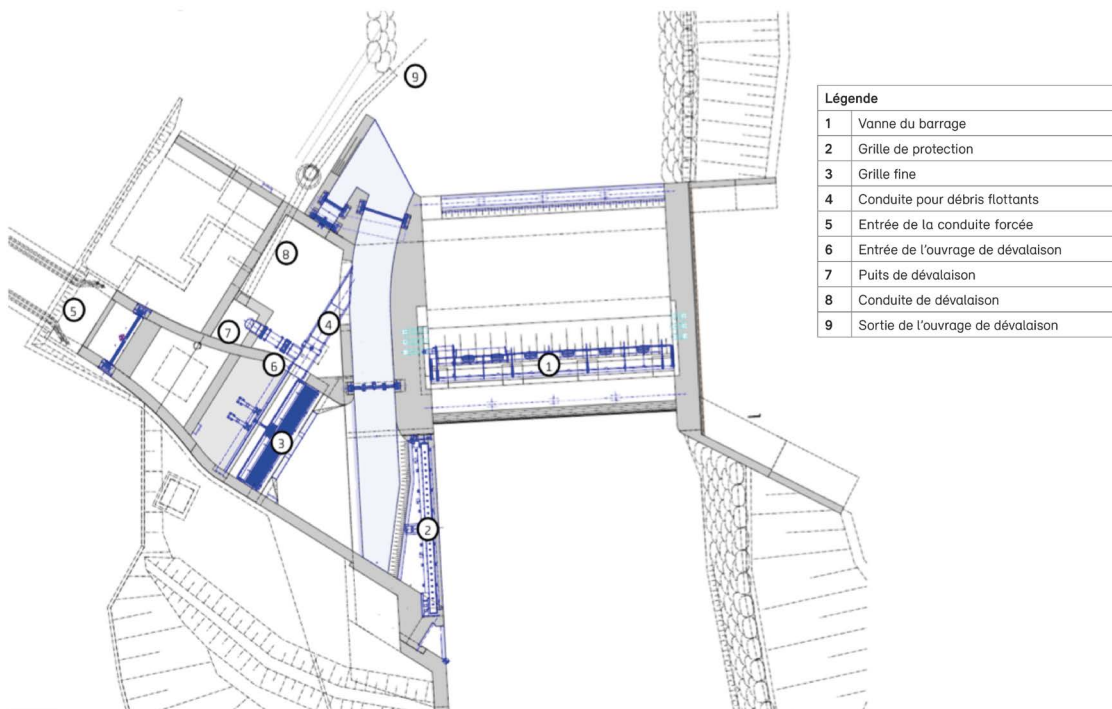
²³ Hauteur de chute maximale, généralement pour Q_{330}

²⁴ Vitesse normale pour le débit maximal pertinent

²⁵ À l'entrée du by-pass

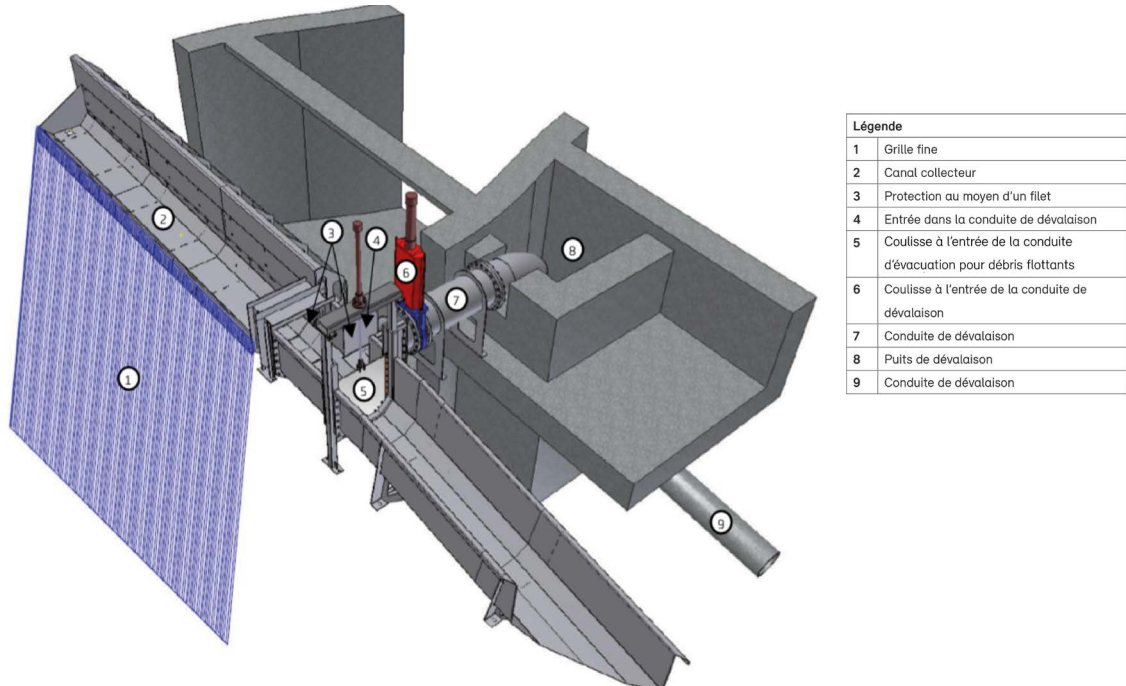
Profondeur minimale du bassin d'amortissement en aval des vannes ou du by-pass	1 m
Remarques complémentaires	
Évaluation / suivi des effets	
Type de contrôle, bureau, rapport	Essai de dévalaison mené par l'Inspection de la pêche et BKW. Des poissons ont été placés dans la conduite de dévalaison, puis capturés à la sortie au moyen d'une nasse et conservés (Zingg 2017).
<p><i>Évaluation différenciée concernant la fonctionnalité</i> La majorité des poissons ont été recapturés. Aucune fuite n'a été constatée lors de leur manipulation.</p> <p>L'entrée du by-pass pourrait être reliée par le fond à la conduite pour débris flottants.</p>	

Fig. 86 : Vue en plan de la prise d'eau de la centrale de Laubegg, sur la Simme



Source : Zingg 2017

Fig. 87 : Enchaînement des éléments constituant l'ouvrage de dévalaison



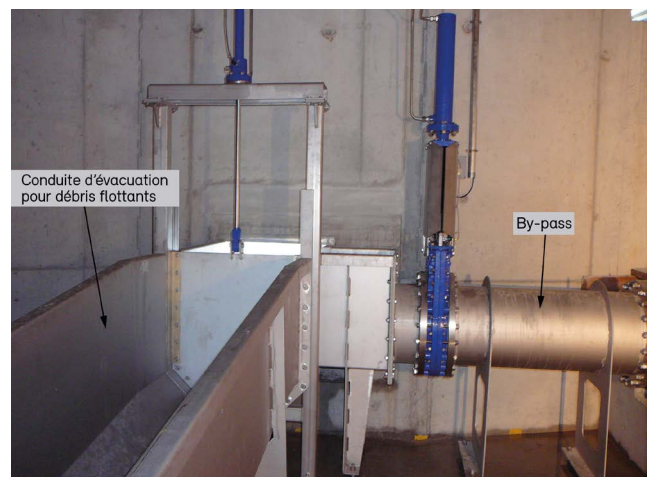
Source : Zingg 2017

Fig. 88 : Chute dans le by-pass



Source : BKW

Fig. 89 : Conduite pour débris flottants et conduite du by-pass



Source : BKW

Fig. 90 : Sortie du by-pass



Source : BKW

