

La passe à méandres – une alternative à la passe à fentes verticales

Matthias Mende, Werner Dönni, Ulf Helbig, Aurélie Koch, Michael Müller, Vasco Neuhaus, Klaas Rathke

Résumé

La passe à méandres est un type d'ouvrage de montaison qui est caractérisé par une succession de bassins arrondis et lisses. La géométrie et la disposition des bassins se distinguent grandement d'une passe à poissons à fentes verticales, ce qui implique des différences essentielles concernant les caractéristiques hydrauliques. Le courant dominant s'écoule principalement le long des parois ce qui laisse au centre du bassin une zone de courant calme avec de faibles vitesses d'écoulement. Les rares contrôles de montaison effectués jusqu'alors sur les passes à méandres ne permettent pas encore d'attester leur efficacité. Pourtant, un nombre élevé de montaisons et un manque de sélectivité de genre ou de taille ont été observés lors de contrôles effectués directement après la construction, ce qui couplé à une mise en place avantageuse et flexible des bassins, fait preuve d'un grand potentiel. Afin de pouvoir profiter pleinement de ce potentiel, cet article propose des recommandations de dimensionnement qui s'orientent vers ceux de la passe à fentes verticales (p. ex. *DWA, 2014*) pour la taille des bassins, la profondeur d'eau et la largeur de fente. Il serait souhaitable de pouvoir démontrer l'efficacité des passes à méandres avec la construction d'installations pilotes suivies par des contrôles de montaison méthodiques et complets dans des cours d'eau disposant d'une population piscicole formée de grandes espèces cibles.

poissons se trouve sur le marché depuis le milieu des années 1990 et a été continuellement perfectionné sur la base de l'expérience acquise par le concepteur et fabricant Peters Ökofisch GmbH & Co. KG. Actuellement, il existe 66 aménagements (*Helbig et al., 2016*). Deux passes à méandres ont été construites en Suisse dans des cours d'eau situés dans une région à truites.

Comme la passe à fentes verticales, la passe à méandres dispose d'une succession de bassins reliés par une fente verticale. Toutefois, les caractéristiques hydrauliques de la passe à méandres sont différentes en raison de la géométrie et de la disposition des bassins qui diffèrent sensiblement de la passe à fentes verticales. De plus, il existe des différences dans la conception et dans les applications possibles de la structure. Le tracé et la pente longitudinale de l'ouvrage sont très variables, ce qui rend la passe à méandres applicable à toutes les situations et avec des coûts de construction souvent nettement inférieurs à ceux des passes à fentes verticales.

Pourtant, on constate que la passe à méandres est aujourd'hui encore rarement construite. Ceci résulte d'une part de recommandations de dimensionnement insuffisantes et d'autre part d'un manque de recherche en raison d'une prise en compte insuffisante des ouvrages de montaison dans la réglementation actuelle. De plus, les dimensions relativement réduites des ouvrages existants sont souvent critiquées car elles ne correspondent pas aux valeurs de dimensionnement prérequis par les règlements actuels (p. ex. fiche technique *DWA, 2014*).

Dans le présent article, les propriétés hydrauliques de la passe à méandres seront analysées en lien avec la migration piscicole. Les avantages et les désavantages de ce type d'ouvrage seront présentés en considérant la conception, la flexibilité de l'arrangement et les possibles modifications après l'achèvement des travaux. Finalement, des recommandations de dimensionnement seront introduites.

1. Introduction

La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et la loi fédérale sur la pêche (LFSP) promeuvent une réduction des effets négatifs dus aux ouvrages hydrauliques sur les cours d'eau. Les ordonnances préposées demandent des mesures d'assainissement concernant le rétablissement de la libre migration piscicole, la réactivation du régime de charriage ainsi que la réduction de l'effet des éclusées jusqu'en 2030. Les coûts liés à l'assainissement s'estiment entre 4 et 5 milliards de CHF selon les prévisions actuelles (*SRF, 2018*).

Une grande partie de cet argent est investie dans le rétablissement de la libre migration piscicole. L'application de cette loi concerne environ mille centrales hydroélectriques, dont environ 700 doivent être réaménagées en termes de montaison et à peu près autant pour des déficits de dévalaison (*Bammatter et al., 2015*). En plus des assainissements liés aux centrales hydroélectriques prévus jusqu'en 2030, la planification des mesures de revitalisation doit inclure l'assainissement

de tout obstacle artificiel non lié aux centrales hydroélectriques jusqu'en 2090. La Suisse compte plus de 100 000 obstacles artificiels avec une hauteur de chute de plus de 50 cm entravant la migration piscicole (*Zeh et al., 2009*). La question se pose alors sur la manière la plus efficace et économique qui permettrait de rétablir la libre migration piscicole en considérant l'ampleur de la tâche à accomplir.

La construction d'ouvrages de franchissement permet de rétablir la migration piscicole vers l'amont (montaison), lorsque le démantèlement des obstacles est impossible. Les ouvrages de montaison sont souvent construits en minimisant leur empreinte au sol, car la place qui leur est attribuée est souvent restreinte par son environnement, comme par exemple à proximité de centrales hydroélectriques. Aujourd'hui, la méthode de construction standard est la passe à poissons à fentes verticales, à laquelle il existe une grande expérience dans le monde entier. Une méthode plus récente de construction est la passe à poissons à méandres (désignation du fabricant, Mäanderfischpass®). Ce type de passe à



2. Construction et arrangement

2.1 Variantes de construction

La construction s'effectue comme une passe à bassins successifs. Elle se conçoit avec l'arrangement successif de bassins ronds montés dans un canal rectangulaire. Les bassins sont normalement fabriqués avec des segments de conduite en PRV (Polyester Renforcé de fibres de Verre).

Il existe trois types de construction, C, J et H, qui peuvent être également combinés entre eux. Les variantes de construction se distinguent entre elles principalement par la forme et la longueur des bassins, mais aussi par la pente de la rampe et par le chemin d'écoulement (cf. *Tableau 1* et *Figure 1*).

- Le type de construction C est formé d'une succession de bassins circulaires en forme de C et est adapté aux

pentes situées entre 17 et 30 %. Ceci permet plus particulièrement de construire des ouvrages de montaison dans des espaces restreints.

- Le type de construction J est conçu pour des pentes allant de 8 à 17 %. La différence principale vis-à-vis du type C se situe dans l'allongement du bassin circulaire jusqu'à façonner une forme de J sur le plan du bassin.
- Le type de construction H est formé par l'allongement sur le plan du bassin de la passe à poissons de type J et est, par conséquent, adapté aux pentes situées entre 4 et 8 %. Ce type de passe nécessite une plus grande emprise au sol car ses bassins sont plus longs comparés à ceux de type C et J. Le type de construction H est communément désigné «passe à poissons à demi-méandres».

Le schéma d'écoulement prédominant dépend du type de construction. Un écoulement alterné («méandré») avec une ligne de courant dirigée par les parois externes (définie comme l'écoulement le long des parois) est communément observé dans chaque type de construction. Ainsi, l'écoulement s'effectue de manière continue tout au long de la structure. Quatre types de construction spéciaux existent en plus de ceux mentionnés dans le *Tableau 1* et sont réalisés au moyen de combinaisons ou aussi sous forme de tour (*Helbig et al., 2016*).

A cause du charriage, il n'existe aucun bord tranchant dans les cours d'eau et dans les torrents qui pourrait représenter un risque de blessure pour les poissons. De ce fait, l'utilisation d'éléments de construction arrondis et lisses est une des caractéristiques importantes de la conception de cette structure. Le fabricant s'abstient délibérément d'utiliser des fentes verticales munies de bords tranchants, d'angles droits et des fonds de lit composés de matériaux fracturés. Ceci en se basant sur l'hypothèse que les poissons évitent les bords tranchants et les surfaces rugueuses afin de ne pas se blesser (par ex. la muqueuse de la peau ou les écailles) et en conséquence, se montrent plus distants qu'envers des surfaces plus arrondies et lisses.

| Valeurs caractéristiques | Types de construction | | |
|---------------------------------|--|--|---|
| | C | J | H |
| Vue d'ensemble |  |  |  |
| Pente de la rampe / [%] | 17–30 | 8–17 | 4–8 |
| Diamètre du bassin D_B [m] | 1.00–2.40 | — | — |
| Longueur du bassin L_B [m] | — | 1.50–3.50 | 1.50–3.60 |
| Largeur du bassin B_B [m] | — | 1.00–2.00 | 1.00–2.50 |
| Hauteur du bassin H_B [m] | 0.85–3.00 | 0.75–3.00 | 0.75–3.00 |
| Dotation Q [l/s] | 80–610 | 110–610 | 120–1040 |
| Hauteur de chute Δh [m] | 0.15–0.24 | 0.15–0.24 | 0.08–0.24 |
| Nombre d'ouvrages construits | 42 | 15 | 5 |

Tableau 1: Valeurs caractéristiques des types C, J et H (source: fabricant).

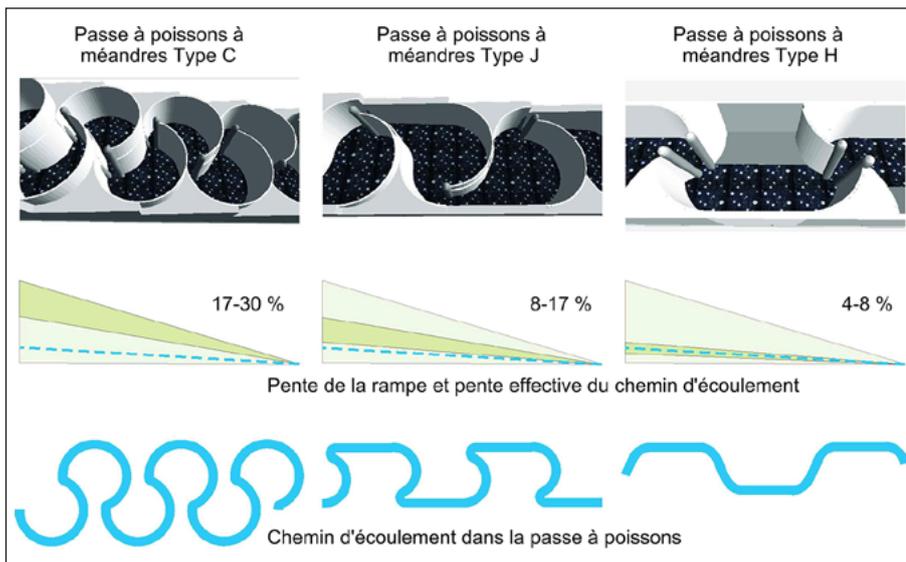


Figure 1: Domaine d'application de la pente de la rampe (vert foncé), pente effective du chemin d'écoulement (ligne bleue pointillée) et chemin d'écoulement en fonction du type de passe à poissons à méandres (source: fabricant, modifié).

2.2 Construction du fond de bassin et dimensionnement de la fente

Structure du fond

La structure du fond est composée d'une couche de graviers arrondis (en général de diamètre 16/32 mm, épaisseur environ 80 mm) recouverte d'une géogrille (polyéthylène) stabilisante (*Figure 2*). La fixation de la géogrille et du gravier arrondi s'effectue au moyen de demi-coques (tuyaux en plastique $D = 14$ cm, $L = 25$ cm, divisés en trois dans le sens de la longueur) qui sont ancrées dans le fond du bassin en béton avec des tiges filetées passant à travers la nappe et la couche de gravier. Pour les passes à méandres récentes, la structure du fond est fixée en plus par un grillage en acier galvanisé (*Figure 3*). Les demi-coques, en plus de leur fonction structurelle, servent à développer des zones de faible écoulement et des endroits couverts (abri) au fond du bassin pour les espèces qui s'orientent sur le fond. Elles sont placées proche des fentes verticales de manière à ce que les poissons proches du fond puissent nager d'un abri à l'autre sans entrer dans la zone d'écoulement principale.

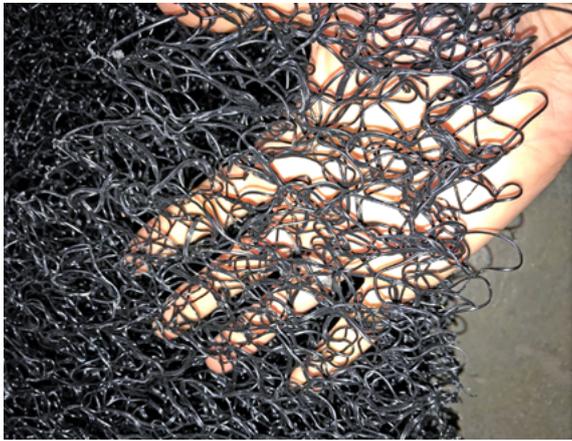


Figure 2:
A gauche:
geogrille en
PE avant la
construction
(photo:
M. Mende);
à droite: civelle
sur la géogrille
d'une passe
à méandres
asséchée (photo:
fabricant).

A cause de la faible vitesse d'écoulement au centre du bassin, une zone de dépôt de sédiments s'y forme et en occupe la majeure partie du fond. Cette zone est souvent recouverte de plantes aquatiques (grande berle, fontinale commune) qui, en plus des demi-coques, mettent à disposition des abris pour les poissons et un habitat pour les invertébrés (Figure 4). L'influence du dépôt de sédiments sur les caractéristiques hydrauliques de la passe à poissons est négligeable car elle intervient uniquement au milieu du bassin où le courant est faible. Aucun dépôt considé-

nable de sédiments ne se forme dans la zone d'écoulement principale le long de la paroi.

La construction du fond permet d'obtenir une couche stable de matériaux meubles, malgré une pente de rampe souvent très élevée (Tableau 1). Comparé à une construction de fond classique avec des matériaux fracturés, le fond de la passe à méandres a l'avantage de pouvoir être clairement défini et construit au niveau requis. Ceci permet de garantir les caractéristiques hydrauliques souhaitées dans l'ouvrage de montage.

Disposition de la fente verticale

Comme la passe à fentes verticales, la passe à méandres dispose d'une succession de bassins reliés par une fente verticale (Chapitre 1). La différence se situe dans le fait que le bord de la fente verticale de la passe à méandres est arrondi et que la fente se rétrécit en forme de V en direction du fond (Figure 3 à droite). La largeur de la fente est ajustable de manière variable au moyen de tubes en plastique (diamètre 14 cm, fendus sur la longueur et fixés sur les éléments du bassin, Figure 3 à droite). Elle peut aussi être adaptée de ± 7 cm après la mise en service. Outre l'ajustement ultérieur du débit de la passe, ceci permet notamment d'ajuster avec précision la hauteur de chute entre les bassins qui ne devrait différer du dimensionnement que dans des cas particuliers.



Figure 3: A gauche: arrangement et conception de bassins de type C (en construction); à droite: disposition d'une fente verticale (Barrage sur l'Echaz, Reutlingen; photos: J. Stork).

2.3 Espace requis et tracé

Les passes à poissons à méandres réalisées jusqu'ici sont normalement construites avec des bassins plus petits que ceux qui seraient employés pour une passe à fentes verticales au même endroit (Chapitre 1). Ainsi, les recommandations relatives aux valeurs limites géométriques (par ex. DWA, 2014) ne sont pas respectées ce qui a permis de réduire l'espace requis par rapport à une passe à fentes verticales. Dans la considération suivante, il est admis que la longueur, respectivement le diamètre des bassins et la hauteur de chute entre les bassins correspondent à ceux d'une passe à fentes verticales.

Les passes à bassins successifs rectangulaires, comme la passe à fentes verticales, nécessitent des bassins plus larges lors d'un changement de direction dans le tracé de la passe à poissons. Ainsi, les bassins sont deux fois plus grands par exemple, lors d'un brusque changement de direction (virage à 180°) et environ 25 % plus larges lors d'un changement de direction de 90°.



Figure 4: Bassin vide de type C avec une grande berle au centre (photo: U. Helbig).

La passe à méandres de type C est le type de construction le plus compact. Deux bassins sont disposés côte à côte et s'entrelacent, permettant d'atteindre une pente deux fois plus grande que celle obtenue avec une passe à méandres de type J (Tableau 1). La passe à méandres de type C permet aussi, sous une forme légèrement modifiée, d'obtenir une passe à poissons en hélice avec un tracé en spirale (Figure 5).

Un arrangement similaire de bassins successifs avec une forte pente comparable à celle du type C n'est que rarement réalisé avec des bassins à fentes verticales. La meilleure comparaison est probablement la passe à fentes verticales avec des bassins alternés (Figure 6). Comme l'eau se déverse en travers de la pente de la passe, la longueur du bassin L_B (distance de la fente verticale jusqu'à la paroi opposée) est à considérer comme la largeur du bassin (transversalement à la pente). Les bassins doivent être au moins un tiers plus

larges que les bassins standards pour respecter les valeurs indicatives selon la DWA (2014). La largeur complète de deux bassins arrangés côte à côte constitue donc au minimum deux fois la longueur recommandée. En revanche, la largeur complète de la passe de type C est en raison du chevauchement seulement 1.5 fois le diamètre du bassin et donc 25 % plus étroite. Un autre facteur de réduction de la largeur totale de la passe à méandres s'ensuit de l'utilisation de segments fins de tuyaux en PRV, qui ont une épaisseur nettement plus mince (environ 15 à 34 mm) que celle des parois en béton qui constituent normalement la passe à fentes verticales. Grâce à un arrangement compact doté d'une forte pente, la passe à méandre de type C peut parfois être réalisée dans des espaces restreints où la construction d'une passe à fentes verticales serait impossible.

La passe à méandres de type J, qui a un rapport largeur/longueur similaire à la

passe à fentes verticales, ne présente pas d'avantages particuliers en dehors de parois plus minces et de bassins moins profonds grâce à la construction moins épaisse de la rampe de fond (cf. chapitre 2.2; dimensionnement de l'épaisseur de la couche de substrat d'une passe à fentes verticales $d_F \geq 30 \text{ cm}$ (DWA, 2014)). La passe à méandres de type H présente un rapport largeur/longueur plus petit que le type J et peut ainsi également être utilisée dans des couloirs étroits (Figure 7).

En combinant les trois types de construction, les passes à méandres peuvent s'adapter à l'espace disponible et en font souvent le meilleur usage possible (Figure 7). La combinaison permet aussi de varier la pente du canal ce qui permet de contourner des obstacles comme par exemple des conduites (canalisations, tranchées de câbles, etc.) et d'éviter ainsi de coûteuses transformations.

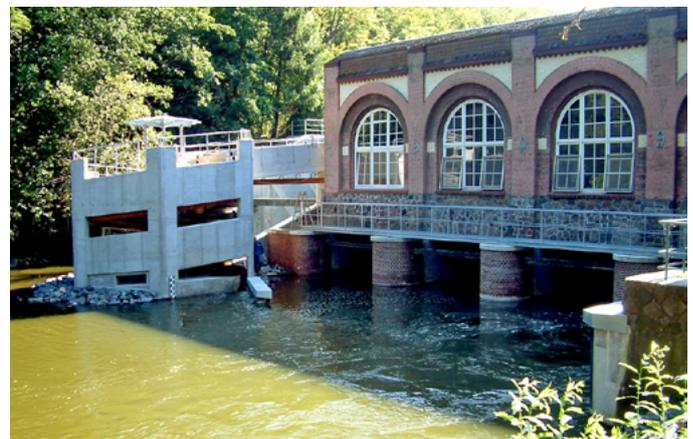


Figure 5: Passe à poissons en hélice, Schwentine/Schleswig-Holstein (photos: E. Kuberski).



Figure 6: Passe à fentes verticales avec bassins alternés (photo: www.ibhandrick.de).

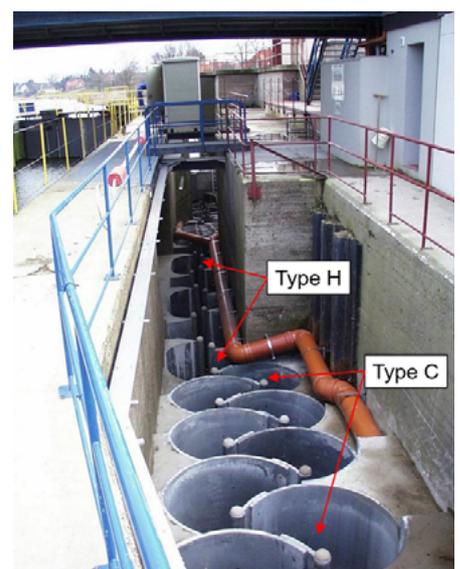


Figure 7: Passe à méandres avec une combinaison de type C et H avant sa mise en service, Weserstaustufe Drakenburg (photo: fabricant, modifiée).



Figure 8: A gauche: schéma d'écoulement dans une passe à méandres de type C (exemple: Birse/Courrendlin JU; photo: J. Stork); à droite: schéma d'écoulement («dissipation d'énergie» – côté gauche et «écoulement stable» – côté droite, selon DWA 2014) dans une passe à fentes verticales (exemple: Moselle/Coblence, Rhénanie-Palatinat; photo: M. Mende).

3. Caractéristiques hydrauliques (type C)

La plupart des passes à méandres réalisées jusqu'ici sont de type C (Tableau 1). De ce fait, les caractéristiques hydrauliques de ce type de construction seront analysées plus en détails dans ce chapitre. Les types de construction J et H s'assimilent à une passe à fentes verticales de par leur géométrie plus étendue et leur taille de bassin moins compacte. Néanmoins, les conditions hydrodynamiques du type de construction C (écoulement alterné, ligne de courant longeant les parois extérieures et continuité de l'écoulement) s'appliquent aussi aux types J et H (Chapitre 2.1).

3.1 Caractéristiques hydrauliques du bassin

Contrairement à la passe à fentes verticales, où la disposition de la fente oriente l'écoulement vers le milieu du bassin (Figure 8 à droite), l'écoulement entre la fente supérieure et inférieure de la passe à méandre de type C est orienté le long de la paroi extérieure du bassin. Par conséquent, il s'ensuit une ligne de courant continue tout au long de la paroi, formant un écoulement dominant stable et nettement délimité du reste du bassin. L'écoulement s'oriente le long de la paroi extérieure à cause d'une déviation permanente générée par la force d'inertie, ce qui crée un couloir d'écoulement méandré et continu (Figure 8 à gauche, Figure 9).

L'écoulement extérieur incurvé reste manifestement compact et stable, contrairement un écoulement en ligne droite le long d'une paroi latérale. Les auteurs considèrent ceci comme avantageux par rapport à un jet issu de la fente non guidé ou linéaire qui se dissipe avec une expansion continue dans l'espace libre du bassin (Rajaratnam, 1976). Un jet non guidé issu de la fente et entrant en contact avec le volume d'eau du bassin, tel qu'il se présente par exemple dans une passe à fentes verticales (Figure 8 à droite), a tendance à former un jet instable à cause d'importants cisaillements entre le jet et le volume d'eau. Une légère modification des paramètres peut entraîner une dissipation prématurée et incontrôlée du jet issu des fentes verticales, ce qui peut modifier de manière imprévisible le comportement hy-

draulique et changer un écoulement stable en écoulement dissipé (selon DWA, 2014) et inversement.

Outre l'écoulement extérieur incurvé et prononcé, une vaste zone de recirculation composée globalement d'un vortex lent et stable tournant autour d'un axe vertical se forme au centre de la passe à méandre. Ce vortex est conduit dans la zone de cisaillement par la dissipation d'énergie induite par l'écoulement allant de fente en fente en longeant la paroi incurvée (vortex stable). Il en résulte un ralentissement des vitesses d'écoulement de l'extérieur à l'intérieur du vortex, où la vitesse s'approche quasiment de $v=0$ m/s en son centre (Figure 8 à gauche, Figure 9).

Tout comme les autres passes à bassins successifs, une grande partie de l'énergie cinétique de l'écoulement issu de la fente

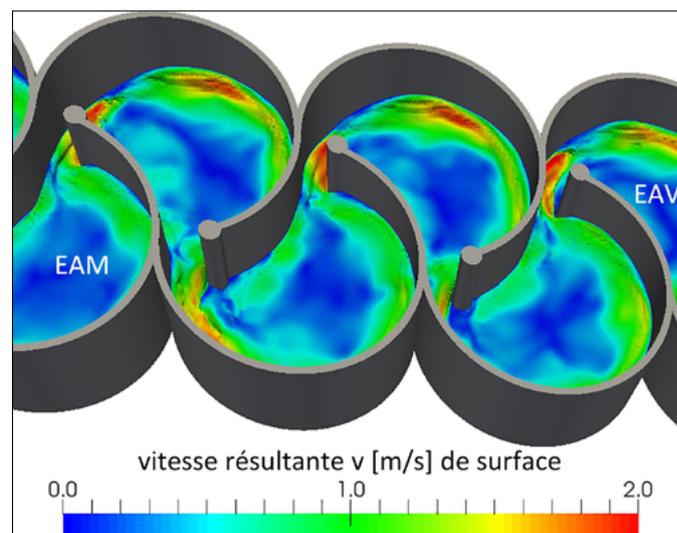


Figure 9: Section d'une passe à méandres de type C, simulation 3d-HN (OpenFOAM®, méthode SGS, EAV = en aval, EAM = en amont; source: UT Dresden/IWD).

d'une passe à méandres doit être dissipée. Une hauteur de chute relativement constante quant au niveau d'eau nominal entre les bassins permet de dissiper l'énergie de façon homogène avec un courant presque uniforme tout au long de la passe à poissons. La dissipation d'énergie du courant incurvé caractéristique de la passe à méandres s'effectue principalement par frottement le long de la paroi extérieure du bassin, ainsi que dans la zone de cisaillement entre le vortex présent dans le volume d'eau central et l'écoulement extérieur. La zone de cisaillement proche de la paroi extérieure, aussi bien que celle entre le vortex au centre du bassin et l'écoulement extérieur sont comprimés par rapport à une situation rectiligne (Guitton, 1964; Rodney, 1972). La dissipation d'énergie absolue est dans son ensemble plus faible que pour l'écoulement d'un jet dans un volume d'eau libre, car le frottement de la paroi externe a un effet de dissipation plus faible que la zone de cisaillement dans le fluide. Une vitesse moyenne un peu plus élevée à travers la fente est donc attendue pour une même hauteur de chute Δh et pour une même longueur de chemin d'écoulement par rapport à la passe à fentes verticales. Cette augmentation de vitesse pourrait, au besoin, être compensée par un agrandissement du diamètre des bassins ou/et une réduction de la hauteur de chute.

Le schéma d'écoulement ci-dessus, typique du type C, est composé d'une ligne de courant dominante sur l'extérieur du bassin et d'une zone de repos centrale. Ceci permet de tirer les conclusions suivantes:

- Le courant sur l'extérieur du bassin est caractérisé par une grande vitesse d'écoulement dirigée le long de la paroi et est ainsi compacte avec une expansion restreinte. Comme des mesures l'ont montré, les vitesses maximales dans le bassin apparaissent légèrement en aval de l'ouverture de la fente (IWD, 2016, voir aussi Chapitre 3.2). Les conditions d'écoulement dans un bassin sont relativement constantes tout au long de l'aménagement, l'écoulement sur le bord extérieur est continu et permanent.
- La plus grande partie du bassin est caractérisée par un écoulement peu turbulent avec de faibles vitesses et forme donc un espace généreux pour que les poissons puissent se reposer avant de monter dans le bassin suivant.
- L'information directionnelle à disposition des poissons reste imperturbable avec le vortex en rotation lente au centre et la zone de transition dirigée vers le courant extérieur qui indique clairement le chemin à suivre pour trouver la prochaine fente.

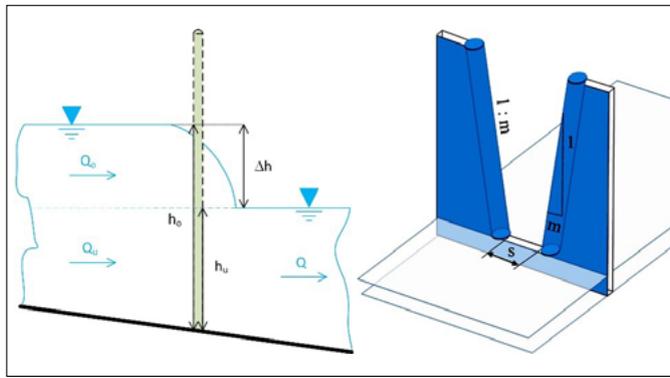


Figure 10: A gauche: principe d'écoulement à travers une fente comme combinaison d'un déversement et d'un écoulement noyé; à droite: valeurs caractéristiques de la fente (avec bords arrondis).

3.2 Estimation du débit et vitesse maximale

La géométrie de la fente est pertinente d'un point de vue hydraulique car, allant jusqu'au fond et ayant une largeur respectivement connue, elle forme une section transversale de contrôle permettant de déterminer le débit de la passe. L'avantage de la passe à méandres est que la position du fond de la passe est déterminée avec précision et que la largeur de la fente reste variable et peut donc être adaptée, in situ, aux conditions respectives du site (Chapitre 2.2).

L'écoulement à travers la fente verticale est formé d'un écoulement noyé (principe de Torricelli, Q_u) et d'un déversement (formule de Poleni, Q_o , Figure 10 à gauche). La détermination du débit de la fente selon les formules 8.14, 8.15a ou 8.15b de la fiche technique actuelle DWA-M 509 (DWA, 2014, p. 244, en allemand) n'est pas recommandée par les auteurs, car d'après les connaissances actuelles, les mesures du débit (Q) de l'université technique de Dresde (TU Dresden) présentent des écarts allant jusqu'à 30%. Selon une étude de cette université, le débit peut être déterminé suffisamment bien en utilisant l'approche décrite dans Aigner (2016). Par contre, la vitesse d'écoulement d'approche v_a requise est difficile à obtenir en pratique et ne peut pas être clairement déterminée. Sa part ne peut toutefois pas être négligée comme le démontrent les mesures et comme déjà mentionné dans le chapitre 3.1, à cause d'une dissipation d'énergie plus faible. Par simplification, seule la hauteur de chute Δh ainsi que le coefficient de débit μ_{mod} qui représente la part d'énergie cinétique résultante de v_a , seront considérés. Ainsi, la formule suivante s'applique pour une section transversale en forme de trapèze:

$$Q = \mu_{mod} \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \cdot \left[\left(h_u + m \cdot \frac{h_u^2}{s} \right) + \left(\frac{2}{3} \cdot \Delta h + 0.406 \cdot m \cdot \frac{\Delta h^2}{s} \right) \right] \quad \text{avec} \quad \mu_{mod} = \mu_0 \cdot \mu_1 \quad (1)$$

ou plutôt pour un rétrécissement de canal sans changement de régime d'écoulement:

$$Q = \mu_{equ} \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_0^{3/2} \quad \text{avec} \quad \mu_{eq} = 1.35 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0^3}} \cdot \left[\left(h_0 + m \cdot \frac{h_0 - \Delta h}{s} \right) - \left(\frac{1}{3} \cdot \Delta h - 0.406 \cdot m \cdot \frac{\Delta h^2}{s} \right) \right] \quad (1)$$

où μ_0 est le coefficient de base de la section transversale selon la formule d'Euler ($\mu_0 = 0.537$ à 0.577 pour une section transversale trapézoïdale et avec des bords arrondis, Aigner & Bollrich, 2015) et μ_1 décrit l'influence de la vitesse d'approche. Par exemple, la valeur μ_1 a été définie à $\mu_1 \approx 1.715$, dans le cadre de plusieurs études (mesures en laboratoire ou dans la nature, simulations) pour la variante de type C.

Dans l'Eq. (1), μ [-] représente le coefficient de débit, s [m] la largeur de la fente au niveau du lit (Figure 10 à droite), h_0 et h_u [m] la hauteur d'écoulement relative à la hauteur moyenne d'eau en amont (h_0), respectivement en aval (h_u) de la fente. La valeur Δh [m] décrit la hauteur de chute relative à la hauteur moyenne d'eau entre deux bassins successifs, m [-] définit la valeur moyenne de la pente de la fente verticale (Figure 10 à droite). L'Eq. (1) s'applique pour une section transversale rectangulaire avec $m=0$.

Comme pour toutes les passes à fentes verticales, la vitesse d'écoulement maximale dans l'aménagement apparaît juste en dessous de la fente et peut être bien approximée utilisant la formule basée sur celle de Torricelli.

$$v_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h + v_a^2} \quad (2)$$

Là aussi, la part dérivée de la vitesse d'écoulement d'approche v_a ne peut pas être négligée à cause de la faible dissipation d'énergie dans la passe à méandres. En utilisant la relation

$$\mu_1 = \left(1 + \frac{v_a^2}{2 \cdot g \cdot \Delta h} \right)^{1.5} > 1.0$$

(Aigner & Bollrich, 2015, p. 337), la vitesse d'écoulement maximale est définie par l'Eq. (3), ce qui engendre un résultat supérieur d'environ 20% par rapport à l'approximation négligeant la vitesse d'approche

(c.-à-d. $v_a=0$ dans l'Eq. (2), valable pour une passe à fentes verticales avec un schéma d'écoulement «dissipé»).

$$v_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \mu_1^{2/3}} \quad (3)$$

Il convient également de remarquer que la vitesse d'écoulement dans la fente ne dépend pas linéairement de la hauteur de chute (Δh), cf. Eq. (2), par contre, c'est le cas de la densité d'énergie (ρ_D) qui agit comme un paramètre de substitution afin de caractériser la turbulence (DWA-M 509). Par exemple, une augmentation de la hauteur de chute de $\Delta h=0,15$ m à $\Delta h=0,20$ m augmente la vitesse d'écoulement de seulement 15 % environ, sans considérer v_a tandis que la densité d'énergie utilisée comme paramètre de substitution à la turbulence augmente d'environ 33 %. Cela laisse supposer que pour le franchissement, les caractéristiques de la turbulence, dont sa répartition dans les bassins circulaires est évaluée de manière positive (Chapitre 3.1), jouent un rôle plus important que la vitesse d'écoulement.

4. Contrôles de l'efficacité de montaison

La fonctionnalité d'un ouvrage de montaison peut être évaluée sur la base de son efficacité, de sa performance (efficacité) et de sa sélectivité par rapport aux poissons migrants (détails cf. Zaugg et al., 2017). L'efficacité se mesure par le nombre absolu de montaisons (comptage), typiquement par la mise en œuvre de méthodes de recensement (nasse, bassin de comptage, vidéo, etc.). La performance est basée sur les fréquences relatives. Pour ce faire, le nombre de poissons qui trouvent l'entrée de la passe, qui y entrent et qui franchissent l'ouvrage est relevé. De plus, le temps requis pour trouver la passe et la durée de la montaison sont enregistrés avec l'utilisation de méthodes de marquage. Pour finir, la sélectivité donne une description de toutes les sortes et grandeurs de poissons qui ont pu franchir l'ouvrage avec succès. Le relevé de ces paramètres se fait idéalement en utilisant des méthodes de comptage et de marquage.

Un contrôle d'efficacité de montaison donne des résultats significatifs si les paramètres jugés pertinents ont été récoltés avec les méthodes appropriées durant les bonnes saisons et sur une période de temps suffisamment longue. En outre, des données sur l'inventaire piscicole et leur fréquence d'apparition en aval de l'aménagement, sur le régime fluvial et la température, ainsi que des données opérationnelles des turbines et des vannes, tout comme d'éven-

tuelles informations complémentaires sont nécessaires afin d'interpréter les résultats de montaison. Finalement, la définition de critères spécifiques permet d'obtenir une évaluation minutieuse et objective des données.

Au total sept contrôles d'efficacité de montaison ont été effectués sur six passes à méandres en Allemagne de 2002 à 2011 (Tableau 2). Les contrôles ont été effectués indépendamment du fabricant. Ceci concerne deux ouvrages de type C et H respectivement, un de type J et un ouvrage combiné de types C et H (Figure 7). Tous les contrôles ont été effectués en utilisant exclusivement la méthode de comptage (nasse ou bassin de comptage), comme il était alors d'usage.

4.1 Efficacité

L'endroit qui a recensé le plus grand nombre de poissons capturés par jour était Bahnitz sur la Havel (type H). En moyenne, plus de 600 poissons par jour ont été capturés lors du relevé. Sur la Weser (Visurge) à Drakenburg (combinaison de type C et H) et à Hamelin (type C), environ 250, respectivement 180 poissons ont été capturés en moyenne par jour durant deux périodes estivales. Le nombre de poissons capturés sur les autres installations était nettement moins élevé.

Trois sites sur six utilisaient un système de capture avec des nasses en treillis métallique ou en tiges en plastique ou alors en tôle perforée. Sur ces sites, de nombreux poissons ont probablement quitté le dispositif de comptage avant même d'avoir pu être recensés. Les dispositifs de capture des trois autres sites étaient aménagés avec des nasses formées de filets. Ces nasses assuraient une meilleure capture des poissons, alors même que le type de construction utilisé, c.-à-d. la longueur, l'ouverture et la taille du maillage n'étaient que partiellement connus et ne correspondaient pas aux recommandations selon Wilmsmeier et al. (2018). En outre, les nasses engendraient des comportements de fuite, signifiant que pas tous les poissons qui franchissaient l'ouvrage sont entrés dans le dispositif de capture.

L'attrait de la passe à méandres n'a été mentionné à aucune installation ou a été classé comme incertain ou insuffisant. Par conséquent, il est impossible de savoir si le nombre de montaisons reflète aussi un manque d'attrait de la passe à méandres. A cela s'ajoutaient parfois d'autres contraintes comme des travaux de construction dans le cours d'eau, du vandalisme, des problèmes techniques, etc. Le nombre de montaisons relevé à chaque installation est donc à

considérer comme une valeur minimale du nombre effectif de poissons ayant franchi la passe à méandres. Ces valeurs ne permettent donc pas de démontrer l'efficacité de l'aménagement et par conséquent, une analyse comparative des résultats des différents types de passe à méandres n'est actuellement pas possible.

4.2 Performance

Les méthodes de comptage utilisées ne permettent pas de tirer de conclusion sur l'efficacité des passes à méandres. De plus il n'est pas possible de savoir, combien de poissons ont réellement trouvé l'entrée de la passe et combien d'entre eux ont réussi le franchissement, tout comme le temps qu'il leur a fallu pour franchir la passe.

4.3 Sélectivité

Les contrôles d'efficacité de montaison ont fourni des résultats plus précis concernant la sélectivité de la passe à méandres par rapport à la taille des poissons migrants. D'après la comparaison entre les espèces capturées en aval et celles retrouvées dans le dispositif de comptage, la plupart des installations ne présente aucune sélectivité apparente des poissons migrants. Ceci du moins, si l'on prend en compte les espèces capturées dans les dispositifs de comptage avec quelques captures individuelles dans le cours d'eau en aval. Sur trois sites, le nombre d'espèces confirmé dans la passe à méandres a été plus élevé que celui en aval. A Bahnitz, la proportion des espèces confirmées dans la passe s'élevait à seulement 60 % mais le relèvement n'a duré qu'un mois. Le quota était de 50 % et 20 % en 2005, respectivement en 2007 à Rothen, où très peu de poissons ont été recensés dans la passe à méandres.

Une sélectivité des petits poissons peut être très probablement exclue sur la base des résultats de comptage. Concernant les gros poissons, il n'est pas encore possible de prouver l'existence d'une sélectivité à l'heure actuelle en raison du nombre de captures naturellement bas.

4.4 Récapitulation

Les quelques contrôles de montaison effectués ne permettent pas d'évaluer de manière fiable l'efficacité et la performance des passes à méandres. Le nombre parfois élevé de montaisons et l'absence de sélectivité vis-à-vis des espèces et des poissons de petite taille soulignent le grand potentiel de la passe à méandres, qui doit cependant encore être démontré par des contrôles d'efficacité de montaison complets et standardisés.

| Cours d'eau | | | Passe à méandres | | | | | Méthode de recensement | |
|---------------------|-------------------|----------------|------------------|-----------------------|-----------------|---|--|---|-------------------------|
| Nom (lieu) | Région piscicole | Largeur du lit | Type | Nombre de bassins | Mise en service | Détails | Attrait | Système de capture | Espace-ment du maillage |
| Havel (Bahnitz) | Région à brèmes | 60 m | H | 5 | 2005 | Pente 4,0%; longueur de bassin 3,60 m, largeur de bassin 2,50 m, largeur de fente 41–60 cm; fond de la passe rugueux | Insuffisant: positionnement de l'entrée très attractif, mais débit d'attrait trop faible | Combinaison cage de piégeage / bassin de comptage | 8–9 mm |
| Mildenitz (Borkow) | Région à brèmes | 10 m | J | 17 | 2006 | Dénivelé total 2,4 m, pente 8,3%. longueur 46 m (partie avec bassins 29,68 m), largeur de bassin 1,45–1,5 m; fond de la passe rugueux | Pas d'indication | Cage de piégeage | 6–8 mm |
| Mildenitz (Rothen) | Région à brèmes | 10 m | C | 9 | 2005 | Dénivelé total 1,2 m. largeur de fente 10–15 cm | Pas d'indication | Cage de piégeage Cage de piégeage | 6–8 mm 6–8 mm |
| Weser (Drakenburg) | Région à barbeaux | 150 m | C et H combinés | 34 (dont 7 de type H) | 2000 | Largeur de fente en bas 12,5 cm, en haut 25 cm; hauteur de chute 15 cm, vitesse max. 2,2 m/s; fond de la passe rugueux | Pas d'indication | Cage de piégeage | 14–16 mm |
| Weser (Hameln) | Région à barbeaux | 50 m | C | 18 | 2002 | Dénivelé total 2,0 m. longueur 19 m, largeur de bassin 2,0 m, largeur de fente en bas 12,5 cm, en haut 25 cm, hauteur de chute par fente 19,3–20,0 cm; vitesse max. 2,0 m/s; débit équipé 300 l/s; fond de la passe rugueux | Pas d'indication | Bassin de piégeage | 10 mm (tôle perforée) |
| Oker (Braunschweig) | Région à barbeaux | 20 m | H | 20 | 2003 | Dénivelé total 2,1 m, pente 4,4%. longueur 67 m, longueur de bassin 2,26 m, largeur de bassin 1,4 m, largeur de fente en bas 12–14 cm, en haut 19–24 cm, différence de niveaux d'eau 10–15 cm; vitesse max. 1,3 m/s; débit équipé 156 l/s | Incertitude; une dotation supplémentaire de 100 l/s est ajoutée en cas d'augmentation du débit du cours d'eau pour améliorer l'attrait | Bassin de piégeage | 10 mm (tôle perforée) |

Tableau 2: Contrôles de l'efficacité des montaisons effectués sur les passes à méandres.

| | | | Résultats | | | | Remarques | Littérature |
|---|---|---|------------------|---|--|--|--|----------------------------------|
| Goulet | Période | Jours de capture | Fréquence | Selectivité par rapport à l'espèce | Selectivité par rapport à la taille | En aval | | |
| Fils de filet | Mai | 30 | 18 433 poissons | 13 espèces, dont 7 avec plus de 10 individus. Les espèces manquantes lors de la pêche ont seulement été détectées de manière isolée (excepté la bouvière) | Pas pour les poissons de petite taille; incertain pour les grands poissons (jusqu'à 60cm), car seul quelques-uns ont été capturés. | 18 espèces, dont 11 avec plus de 10 individus. | Plusieurs améliorations du système de capture durant les 10 premiers jours; ensuite opérationnel, mais pas entièrement capable de capturer. Travaux de construction. | <i>Wolter et Menzel, 2011</i> |
| Nasse | Début avril à mi-juin, Fin octobre à début novembre | 23 (toutes les deux semaines durant 72 h) | 1125 poissons | 12 espèces, dont 7 avec plus de 10 individus. Aucune sélectivité. | Jusqu'à 65 cm | 12 espèces, dont 5 avec plus de 10 individus. | Indice de fonctionnalité d'après <i>Ebel et al. (2006)</i> : bon (classe B) | <i>Waterstraat et al., 2007</i> |
| Nasse | 2005: mi-avril à fin mai, Fin octobre à début Novembre | 16 (toutes les deux semaines durant 48 ou 72 h) | 54 poissons | 8 espèces, dont 2 avec plus de 10 individus | Jusqu'à 25 cm | 12 espèces, dont 4 avec plus de 10 individus. | Problèmes avec la cage de piégeage (vandalisme) | <i>Waterstraat, 2005</i> |
| Nasse | 2007: mi-avril à fin mai, Fin d'octobre à début novembre | 10 (toutes les deux semaines durant 72 h) | 51 poissons | 6 espèces, dont 2 avec plus de 10 individus | Jusqu'à 22 cm | Aucune | | <i>Waterstraat, 2007</i> |
| Treillis métallique avec échappatoire 30 x 30 cm, longueur 1,25 m | 2002: fin mai à fin octobre; 2003: fin mars à fin octobre | 337 | 83 897 poissons | 24 espèces, dont 24 avec plus de 10 individus | Aucune information, mais indication d'un total de 23,6% de poissons juvéniles (< 10 cm) | Aucune | Problèmes avec la cage de piégeage (vol de poissons intermittent) | <i>Wieland et Nöthlich, 2003</i> |
| Tiges synthétiques de 20 mm de long, juxtaposées | Avril à Novembre (2 ans) | 546 | 100 559 poissons | 25 espèces, dont 19 avec plus de 10 individus | Plus de 70 cm (relativement beaucoup de gros poissons) | 29 espèces, dont 16 avec plus de 10 individus. | Travaux de construction, augmentation du débit par-dessus le déversoir | <i>Rathcke, 2004</i> |
| Tôle perforée | Mi-avril à début juillet | 23 | 883 poissons | 17 espèces, dont 7 avec plus de 10 individus; aucune sélectivité apparente | Jusqu'à 51 cm; aucune sélectivité | 4 espèces, dont 1 avec plus de 10 individus. | Problèmes avec la cage de piégeage (obstruction) | <i>NLWK, 2004</i> |

5. Recommandations de dimensionnement

L'élaboration d'une recommandation de dimensionnement concluante pour la passe à méandres ne peut être réalisée que si l'on répond aux questions fondamentales concernant le passage du poisson en fonction de la conception de la fente et des bassins, c-à-d de l'hydraulique associée. Tant que ceci n'est pas acquis, le dimensionnement doit se faire en considérant des marges de sécurité.

Largeur de la fente s

Dans la fiche technique DWA-M 509 (DWA, 2014), la limite des valeurs géométriques est, en règle générale, dérivée de la taille et des proportions des poissons. Ainsi, la largeur de la fente doit au minimum mesurer trois fois la largeur maximale du poisson ($s=3 \times D_{\text{Poisson}}$). Les passes à méandres réalisées jusqu'ici ont souvent une largeur moyenne de fente plus petite que $3 \times D_{\text{Poisson}}$, permettant en même temps de réduire le débit à travers la passe, ce qui est considéré comme un «effet secondaire» souhaité. Le choix d'utiliser une largeur de fente réduite se fonde sur l'hypothèse que les bords arrondis de la passe à méandres permettent aux poissons de traverser la fente à une distance plus restreinte des bords qu'avec une fente aux bords anguleux (Chapitre 2.1). Tant que cette hypothèse n'est pas confirmée, la conception de la fente devrait être choisie de manière à ce que la recomman-



Figure 11: Une truite de mer dans le bassin de comptage au barrage de la Moselle à Coblenze/Rhénanie-Palatinat (photo: J. Schneider).

dation $3 \times D_{\text{Poisson}}$ soit respectée. Il peut être ensuite vérifié lors du contrôle d'efficacité, que l'utilisation de plus petites ouvertures de fentes verticales n'engendre aucune sélectivité (cf. Chapitre 2.2).

Les passes à méandres réalisées jusqu'alors sont munies de bassins relativement petits (diamètre du bassin $D_B=2,0\text{m}$ par ex. dans une région à barbeaux). De par le faible nombre de contrôles d'efficacité de montaison, aucune sélectivité sur les gros poissons n'a été observée ni infirmée (Chapitre 4.3). Pour l'instant, il est donc recommandé de choisir une longueur intérieure du bassin équivalente à trois fois la longueur des plus grandes es-

pèces de poissons $L_B=3 \times L_{\text{Poisson}}$. Pour la passe de type C, la longueur intérieure L_B équivaut au diamètre du bassin D_B . En considérant la taille des poissons selon le Tableau 15, DWA-M 509 (DWA, 2014), il existe des longueurs de bassin ou des diamètres adaptés à chaque espèce cible, par ex. 1,5 m pour les truites de rivières et ombres, 2,1 m pour les barbeaux et 3,0 m pour les saumons. Pour des raisons techniques de production, le diamètre maximal d'un bassin de type C est actuellement limité à 2,4 m, ce qui en ce moment, ne permet pas de suivre les recommandations actuelles pour les saumons et autres gros poissons. Il est supposé que la dimension des bassins n'ait relativement peu d'influence sur le passage des gros poissons lors d'une répartition appropriée de la turbulence (cf. texte encadré). Pour vérifier cette hypothèse, il serait intéressant de réaliser des installations pilotes avec deux ou trois passes à méandres de type C situées dans des régions piscicoles à grandes espèces et qui seraient soumises intensivement à des contrôles d'efficacité de montaison. Si, au contraire, une sélectivité par rapport à la taille est démontrée, alors les passes à méandres de type C devront être limitées aux régions piscicoles dont la population ne dépasse pas la longueur $L_{\text{Poisson}} \leq 80\text{cm}$.

Les recommandations relatives à la géométrie des bassins d'une passe à fentes verticales sont-elles justifiées?

Les recommandations de dimensionnement des bassins sont couramment basées sur la biométrie des poissons et leurs caractéristiques de mouvement (par ex. la longueur intérieure du bassin $L_B=3 \times L_{\text{Poisson}}$ et la largeur intérieure $B_B \approx 0,75 \times L_B$; DWA, 2014). Il est supposé alors, que les poissons ont tendance à garder leur direction de mouvement à cause de leur «axe corporel relativement rigide» et peuvent donc seulement nager de manière rectiligne (DWA, 2014). Pour ces raisons et afin de respecter les valeurs limites de densité d'énergie (paramètre de la turbulence), il en résulte des bassins avec des dimensions relativement grandes.

L'idée d'un axe corporel relativement rigide est à ce stade remise en question (cf. Figure 11). Il a été prouvé que des gros poissons, parfois de plus de 1 m de long, peuvent faire demi-tours dans un tunnel de 0,5 m de diamètre sans toucher les parois, comme le montrent par exemple des séquences vidéo de l'Université BOKU (communiqué par e-mail de Helmut Mader, 16.5.2019). Ceci conduit à l'hypothèse que le dimensionnement relativement grand des bassins sert avant tout à contenir une faible turbulence dans le bassin et moins à offrir un espace de manœuvre pour les poissons. Sur la base de ses observations, il serait judicieux de remettre en question les recommandations de dimensionnement des bassins et de se demander si elles pourraient être modifiées lorsque la densité d'énergie dans les bassins est relativement faible (comme par ex. pour la passe à poissons E-Nature) ou lorsque la turbulence, dont sa distribution spatiale dans le bassin ne peut pas être exprimée par l'expression de la densité d'énergie, se concentre le long de la paroi comme observé dans les passes à méandres.

Hauteur d'écoulement h_u

Il est recommandé de suivre la valeur de dimensionnement de la passe à fentes verticales selon le Tableau 43 dans DWA (2014) pour dimensionner la hauteur d'écoulement h_u à la sortie de la fente. Ainsi, la hauteur d'écoulement h_u requise s'élève à 0,5 m pour la truite de rivière et à 0,8 m pour le saumon.

Hauteur de chute (différence du niveau d'eau) Δh

Sur la plupart des passes à méandres (type C) réalisées jusqu'ici, la hauteur de chute Δh et le diamètre du bassin D_B ont un rapport d'environ $\Delta h/D_B = 1:10$ ce qui génère une pente de 20%. Les petites passes à méandres construites principalement dans des régions à truites font figure d'exception avec $D_B = 1,0\text{m}$ et $\Delta h = 15\text{cm}$ (pente de 30%). Ce dimensionnement est recommandé uniquement si un entretien régulier peut être garanti à cause de leur faible largeur de fente. Le rapport de $\Delta h/D_B = 1:10$ vaut également pour la passe à méandres située à la Pfortmühle à Hameln sur la Weser ($D_B = 2,0\text{m}$, $\Delta h = 20\text{cm}$) qui se trouve dans une région à barbeaux et qui a été relativement bien étudiée. Cette passe à méandres ne montre apparemment aucune sélectivité de taille pour les poissons de petite taille, malgré la hauteur de chute relativement élevée (Chapitre 4.3). Plusieurs raisons peuvent expliquer ces résultats, à savoir que la hauteur de chute n'influence que faiblement la vitesse d'écoulement à travers la fente comparé à la densité d'énergie, ou alors que la distribution de la turbulence à l'intérieur des bassins est jugée positive (Chapitre 3.1), ou encore par la courte distance jusqu'à la prochaine zone de repos que les poissons doivent surmonter en nageant à travers la fente contre une vitesse d'écoulement élevée (Figure 12). Sur la base des connaissances actuelles, il est conseillé de respecter un rapport

$\Delta h/D_B \leq 1:10$ lors du dimensionnement de la passe à méandres.

Si la hauteur de chute et la vitesse d'écoulement résultante diffèrent sensiblement des recommandations selon DWA-M 509 (2014), un contrôle d'efficacité de montaison devrait être effectué pour détecter d'éventuels effets négatifs et pour éviter de les reproduire lors de futurs projets.

Combinaison de variantes

Il est possible de combiner des types de construction pour pouvoir utiliser au mieux l'espace mis à disposition de la passe à méandres. L'écoulement, ainsi que la distribution des zones de repos, restent continus et ininterrompus car toutes les variantes sont caractérisées par un écoulement principal longeant les parois extérieures. Les combinaisons de passes à méandres réalisées jusqu'alors ont toutes une largeur de fente et une hauteur de chute dimensionnées afin que la vitesse d'écoulement soit égale à chaque fente. Les bassins des aménagements avec des types combinés sont dimensionnés de manière à obtenir la même longueur d'écoulement le long des parois (cf. Figure 1), générant ainsi une dissipation d'énergie plus ou moins égale dans chaque bassin par le frottement sur la paroi et les turbulences. Pour cette raison, le type H a une forme allongée tandis que le type J est plus compact. Les volumes des bassins sont sélectionnés de manières égales, indépendamment du type de construction. Cette

approche semble plausible et devrait donc également être respectée lors de futurs projets.

6. Conclusion et perspective

Le tracé et le dénivelé de la passe à méandres sont très variables et peuvent s'adapter aux conditions locales, particulièrement grâce aux combinaisons possibles entre les différents types de construction. Par ailleurs, sa structure compacte permet souvent de réduire l'espace requis et les coûts de construction comparés à ceux d'une passe à fentes verticales. Les caractéristiques d'écoulement laissent présager l'instauration de conditions hydrauliques favorables au franchissement de la passe à méandres. Les rares contrôles d'efficacité de montaison effectués jusqu'alors ne permettent pas encore d'évaluer définitivement sa fonctionnalité. Par contre, le nombre en partie élevé de montaisons et le manque de sélectivité des espèces et des poissons de petite taille donnent à la structure un grand potentiel de développement, lié aussi à un arrangement avantageux, un coût de construction relativement faible et la possibilité d'ajuster la structure après sa construction. Cependant, le manque de recommandations de dimensionnement approfondies et le faible nombre de contrôles effectués font que sa construction n'est pas suffisamment prise en compte dans les normes actuelles. La principale critique concernant les installations existantes émane souvent du dimensionnement relativement petit des bassins qui ne respecte pas les valeurs limites des normes ordinaires (p. ex. DWA, 2014). Ces dernières recommandent la construction de bassins relativement grands afin de fournir un espace de manœuvre pour les gros poissons et de respecter la valeur limite de densité d'énergie (paramètre de la turbulence). Comme la zone de turbulence dans les passes à méandres se concentre sur la périphérie du bassin et que la majeure partie du bassin présente de faibles turbulences et courants transversaux, l'ouvrage pourrait offrir un espace suffisant aux manœuvres des gros poissons, même avec de petits bassins.

Cette hypothèse ne peut toutefois pas être confirmée par les contrôles d'efficacité de montaison, en raison du nombre naturellement assez faible de captures de gros poissons (Chapitre 4.3). Il est donc recommandé de construire les passes à méandres en se basant sur les recommandations de dimensionnement des passes à

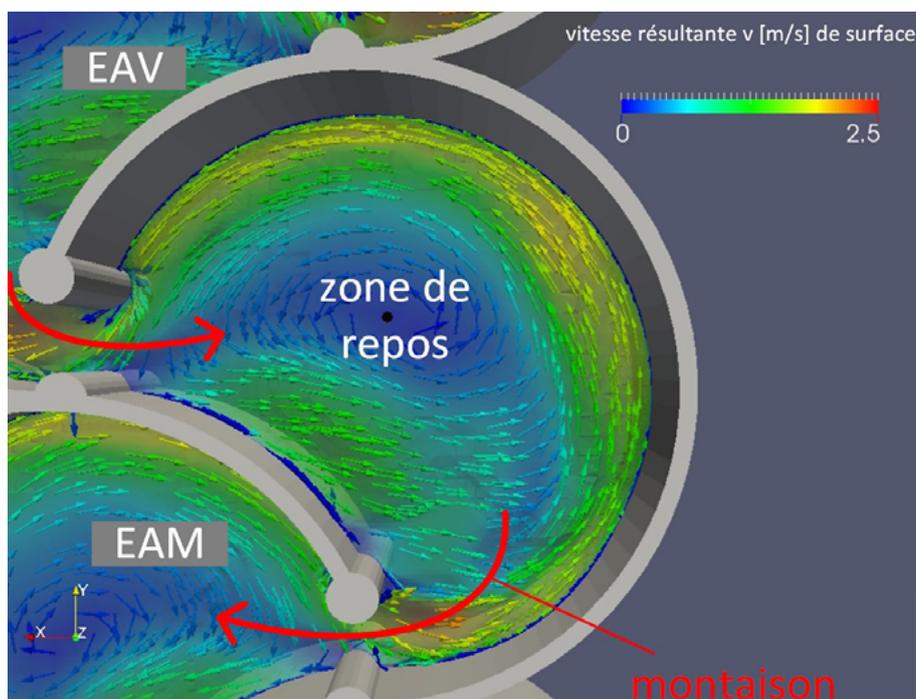


Figure 12: Cheminement des poissons (flèches rouges) à travers les fentes d'une passe à méandres de type C (simulation 3D avec OpenFOAM® méthode SGS, vitesse de surface, EAV=en aval, EAM=en amont; source TU Dresden/IWD).

fentes verticales, comme selon *DWA (2014)*. Pour que les recommandations de dimensionnement puissent garantir une performance optimale de la passe à méandres, les ouvrages doivent être conçus de manière modulable et être évalués par des contrôles d'efficacité de montaison intensifs.

De plus, il est conseillé de réaliser deux à trois aménagements pilotes de type C dans des cours d'eau contenant une population piscicole formée de grandes espèces (p. ex. truite lacustre, brochet, silure).

Pour des raisons techniques liées à la fabrication, les recommandations de dimensionnement des bassins ($D_B = 3 \times L_{\text{poisson}}$) ne peuvent pas être respectées pour des poissons d'aussi grande taille (*Chapitre 5*). Ainsi, ces aménagements combinés à un contrôle d'efficacité de montaison intensif, pourraient apporter une réponse finale quant à la possible sélectivité de la passe à méandres sur les gros poissons. Des résultats concluants et disponibles rapidement pour ce système pourraient permettre de réaliser des économies finan-

cières encore dans le cadre de la mise en œuvre de la LEaux d'ici 2030.

7. Remerciements

Les auteurs remercient *Dr. Martin Henning* (Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe), *Dr. Carl Robert Kriewitz* (BKW Energie AG, Berne) et *Dr. Armin Peter* (FishConsulting, Olten) pour les remarques et critiques constructives.

Références:

Aigner, D. (2016): Der Schlitzpass – Ausfluss- oder Überfallströmung. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 57, TU Dresden

Aigner, D., Bollrich, G. (2015): Handbuch der Hydraulik, Beuth, 2015, S. 334 ff., Berlin

Bammatter, L., Baumgartner, M., Greuter, L., Haertel-Borer, S., Huber Gysi, M., Nitsche, M., Thomas, G. (2015): Renaturierung der Schweizer Gewässer: Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015. Bundesamt für Umwelt, BAFU, 13 S.

DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509.

Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: 334 S. Stand: korrigierte Fassung Februar 2016

Ebel, G., Fredrich, F., Gluch, A., Lecour, C., Wagner, F. (2006): Methodenstandard für die Funktionskontrolle von Fischaufstiegsanlagen. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V., 115 S.

Guittou, D. E. (1964): Two-dimensional Turbulent Wall Jets over Curved Surfaces, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal

Helbig, U., Aigner, D., Stamm, J. (2016): Hydraulik der Schlitzöffnungen bei beckenartigen Fischaufstiegsanlagen. Bautechnik 93 (2016), Heft 5, Ernst & Sohn, Berlin

IWD (2016): Hydraulische Untersuchung der Rundbeckenpassanlage Höxter / Godelheim, Forschungsbericht 2014/08 TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD), Dresden, 2016, 123 S.

Larinier, M. (1992): Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. Bull. Fr. Pêche Piscic., 326/327, p. 45–72

Larinier, M., Porcher, F., Travade, F., Gosset, C. (1994): Passes à poissons: expertise et conception des ouvrages de franchissement. Mise au point. Fr.

NLWK (2004): Funktionskontrolle Mäanderfischpass an der Oker-Mühle in Rothemühle (LK Giffhorn). Aller-

Oker-Lachs-Gemeinschaft (AOLG), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK) – Betriebsstelle Süd, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLO) – Dezernat Binnenfischerei, 16 S.

Rathcke, P.-C. (2004): Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Mäanderfischpasses im Wasserkraftwerk Pförtmühle (Hameln). Stadt Hameln, 49 S.

Rajaratnam, N. (1976): Turbulent Jets, Elsevier Science, 1976

Rodney, J. S. (1972): Flow Patterns in Lakes and Reservoirs – A theoretical and experimental study of several aspects of jet-forced reservoir circulations. University of London, Faculty of Engineering, London

SRF (2018): Todesfallen für Fische – Sanierung der Kraftwerke kostet bis zu 5 Milliarden. Schweizer Radio und Fernsehen. <https://www.srf.ch/news/schweiz/todesfallen-fuer-fische-sanierung-der-kraftwerke-kostet-bis-zu-5-milliarden-franken>, Download am 21.06.2019

Waterstraat, A. (2005): Nachweis der Funktionsfähigkeit der Fischaufstiegshilfen Vorbeck / Warnow, Rothen / Mildnitz und Dobbertin / Mildnitz für Fische und Zoobenthos. Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Schwerin, 33 S.

Waterstraat, A., Renner, K., Blohm, J. (2007): Effizienzkontrolle am Mäanderfischpass Borkow in der Mildnitz (einschliesslich Zusatzuntersuchung am Mäanderfischpass Rothen). Staatliches Amt für Umwelt und Natur Schwerin, 30 S.

Wieland, S., Nöthlich, I. (2003): Funktionskontrolle Mäanderfischpass Drakenburg/Weser. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Auftraggeber: Wasser- und Schiffsamt Verden, BfG-1400, 20 S.

Wilmsmeier, L., Schölzel, N., Peter, A. (2018): Fischwanderung: Kontrollinstrument Zählbecken. Die unterschätzte Bedeutung der Reusenkehle. Bundesamt für Umwelt (BAFU), 48 S.

Wolter, C., Menzel, R. (2011): Funktionsüberprüfung der Fischaufstiegsanlagen an den Havel-Staustufen

Brandenburg und Bahnitz. Wasser- und Schiffsamt Brandenburg, 22 S.

Zaugg, C., Dönni, W., Boller, L., Guthruf, J. (2017): Massnahmenumsetzung Sanierung Fischgängigkeit. Handbuch Wirkungskontrollen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), 82 S.

Zeh Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A. (2009): Strukturen der Fließgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. BAFU, Umwelt-Zustand 0926, 100 S.

Auteurs:

Dr.-Ing. Matthias Mende

IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3000 Bern 14, matthias.mende@iub-ag.ch

Dr. sc. nat. ETH Werner Dönni

Fischwerk, Neustadtstrasse 7, 6003 Luzern, werner.doenni@fischwerk.ch

Dr.-Ing. Ulf Helbig

Technische Universität Dresden/Fakultät, Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, D-01062 Dresden, ulf.helbig@tu-dresden.de

Aurélie Koch

IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3000 Bern 14, aurelie.koch@iub-ag.ch

Dr. sc. techn. ETH Michael Müller

IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3000 Bern 14, michael.mueller@iub-ag.ch

Vasco Neuhaus

IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3000 Bern 14, vasco.neuhaus@iub-ag.ch

Prof. Dr.-Ing. Klaas Rathke

Fachgebiet Hydraulik/Quantitative Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, FB 8 – Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik, An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter, klaas.rathke@th-owl.de