

Profondeurs minimales pour les truites de lac et de rivière

Bases scientifiques et recommandations

Rapport d'expert réalisé sur mandat de
l'office fédéral de l'environnement (OFEV)

Octobre 2016

FISCHWERK
WERNER DÖNNI
FISCHBIOLOGIE • GEWÄSSERÖKOLOGIE • GEOINFORMATIK

AquaPlus

AQUARIUS

Mandant	Office fédéral de l'environnement (OFEV) Worbentalstrasse 68 3063 Ittigen <i>Contact:</i> Andreas Knutti T 058 464 72 83 Andreas.knutti@bafu.admin.ch
Mandataire	Fischwerk Neustadtstrasse 7 6003 Lucerne <i>Contact:</i> Werner Dönni T 041 210 20 15 werner.doenni@fischwerk.ch
Auteur	Werner Dönni (Fischwerk)
Collaborateurs	Lukas Boller (AquaPlus) Claudia Zaugg (Aquarius)
Date de délivrance du mandat	18 octobre 2012
Groupe d'accompagnement	Andreas Knutti (OFEV) Manfred Kummer (OFEV) Marc Baumgartner (OFEV)
Groupe d'experts	Willy Müller (Inspection de la pêche BE) Dimitri Jaquet (service des forêts, de la protection de la nature et du paysage GE) Marcel Michel (Amt für Jagd und Fischerei GR) Jean-Marc Weber (Service de la faune NE) Bruno Polli (Ufficio della caccia e della pesca TI) Frédéric Hofmann (Inspection de la pêche VD) Andreas Hertig (Fischerei- und Jagdverwaltung ZH) Armin Peter (EAWAG) Peter Rey (Hydra)
Traduction	Laurence Frauenlob
Clause de non-responsabilité	Ce rapport a été rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement. Sa teneur n'engage cependant que la responsabilité de ses auteurs.
Citation	Dönni, W., Boller, L., Zaugg, C. 2016: Profondeurs minimales pour les truites de lac et de rivière. Bases scientifiques et recommandations. Etude mandatée par l'Office fédéral de l'environnement, 43 p.
Page de titre	Truite de lac de la Linth, 7.11.2012. © A. Zbinden, service cantonal pêche et chasse du canton Glaris.

Table des matières

Résumé	4
1 Introduction	5
1.1 Valeur de la présente publication	5
1.2 Problématique et mandat	5
1.3 Démarche adoptée	6
2 Bases scientifiques sur la biologie des poissons	7
2.1 Période de migration vers les zones de reproduction	7
2.2 Influence des crues et étiages	8
2.3 Influence de la profondeur	9
2.4 Autres facteurs	10
3 La profondeur minimale	11
3.1 Symboles et définitions	11
3.2 Bases théoriques	11
3.3 Recommandations	13
3.3.1 Consignes concernant les profondeurs minimales	13
3.3.2 Autres aspects	14
4 Détermination du débit résiduel à maintenir	16
5 Marche à suivre et exemple d'application	19
6 Périodes particulières	22
6.1 Saison	22
6.2 Moment de la journée	22
7 Exemples	22
8 Références bibliographiques	23
Annexes	25
A Enquête auprès des experts cantonaux	26
B Profondeurs minimale: bases scientifiques	30
B.1 Profondeur minimale et hauteur du corps	30
B.2 Vitesse de nage	34
B.3 Distance maximale	35
C Profondeur minimale: recommandations et difficultés	37
C.1 Cas général	37
C.2 Hauts-fonds	37
C.3 Cas particuliers	38
C.4 Profondeur minimale par défaut pour une hauteur du corps inconnue	38
C.5 Effets cumulés	40
D Détermination d'une longueur de référence pour la truite de lac	41
E Tronçons à débit résiduel abritant des truites de lac	43

Résumé

Lors de la fixation d'un **débit résiduel minimal** se pose la question de la **profondeur nécessaire** afin de garantir la libre migration du poisson. En général, une profondeur de 20 cm est alors prise en compte en se basant sur le message relatif à la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux). Selon les instructions des autorités fédérales, les exigences écologiques des populations piscicoles présentes doivent cependant être considérées comme déterminantes (Estoppey et al. 2000). Dans les cours d'eau à truite de rivière, une profondeur inférieure à 20 cm peut être tolérée dans certaines circonstances par les autorités compétentes. Dans ceux colonisés par les truites de lac, pouvant atteindre des tailles bien plus importantes, des profondeurs souvent beaucoup plus élevées sont exigées. La truite de lac est une espèce fortement menacée et prioritaire au niveau national. Pour atteindre ses zones de reproduction dans les affluents, elle est tributaire d'une certaine profondeur pendant sa migration de fraie. C'est pourquoi, la fixation d'un débit résiduel garantissant une profondeur suffisante dans les cours d'eau influencés par la force hydraulique s'avère déterminante pour la survie de l'espèce.

Le présent rapport explicite comment la **profondeur** nécessaire aux truites peut être déterminée dans les tronçons à débit résiduel sur la base de critères biologiques. En se basant sur une étude bibliographique et des entretiens avec des spécialistes de la question, les auteurs de ce travail ont effectué une synthèse des connaissances actuelles sur les besoins fondamentaux de la truite de rivière et de la truite de lac en matière de profondeur pour les migrations vers l'amont et vers l'aval. En considérant les données biométriques relatives aux deux écotypes de truite, ils ont ensuite formulé des recommandations pour le calcul de la profondeur minimale. Dans certains cas, les informations biologiques étant manquantes, des solutions pragmatiques ont été proposées.

Trois cas de figure ont été considérés. Une profondeur minimale a tout d'abord été définie pour le **cas général**: elle doit être respectée dans la plus grande partie du tronçon à débit résiduel et correspond à 2,5 fois la hauteur du corps des plus grandes truites de lac ou de rivières présentes. Conformément au message relatif à la loi fédérale sur la protection des eaux et selon la pratique actuelle, une profondeur d'au moins 20 cm doit être garantie. Des profondeurs inférieures à cette valeur générale sont tolérables sur des secteurs limités avec des hauts-fonds naturels sur une distance maximale de 50 fois la longueur totale des individus les plus grands. Sur ces **hauts-fonds**, la profondeur doit atteindre au moins 2 fois la hauteur du corps des plus grands poissons. Un non-respect de cette profondeur minimale n'est à son tour tolérable que dans des **cas particuliers** sur une distance de 5 m au maximum. La profondeur doit alors être d'au moins 1 fois la hauteur du corps et, en tout cas, de plus de 7 cm. Ces situations exceptionnelles peuvent par exemple se présenter lorsque le fond du lit a été aménagé de manière lisse ou sur des affleurements rocheux.

Les méthodes utilisées en Suisse pour déterminer les débits résiduels minimums sont brièvement exposées et des recommandations sont émises à leur sujet en considérant leurs avantages et leurs inconvénients.

Le présent rapport aborde la question de la détermination de la profondeur d'eau nécessaire à la migration de la truite de lac et de la truite de rivière d'un point de vue écologique. Il livre des bases scientifiques pour la détermination des débits résiduels dans les eaux abritant des truites de grandes tailles mais peut également être appliqué à d'autres grandes espèces de poisson. La méthodologie permettant de déduire la profondeur nécessaire a d'ores et déjà été utilisée dans le cas de certaines installations hydrauliques et doit être généralisée. Les méthodes présentées afin d'évaluer le débit résiduel minimal sont d'ores et déjà largement utilisées aujourd'hui.

1 Introduction

1.1 Valeur de la présente publication

Le présent rapport explicite comment la profondeur nécessaire aux truites peut être déterminée dans les tronçons à débit résiduel sur la base de critères biologiques. Les recommandations proposées s'appuient sur des bases scientifiques ainsi que sur l'expertise des services cantonaux compétents en matière de pêche.

Depuis ces dernières années, l'accessibilité des truites à leurs zones de reproduction s'est heureusement améliorée, du moins en partie. De nombreux obstacles ont été assainis de manière à rétablir la migration piscicole. Des populations constituées de grandes truites peuvent ainsi rejoindre une partie de leurs aires de reproduction naturelles. Les nouvelles dispositions de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) visant à rétablir la libre migration du poisson selon les planifications stratégiques cantonales contribuent ainsi à reconnecter les habitats naturels des populations piscicoles. Dans ce contexte, la détermination des débits résiduels doit impérativement prendre en compte les exigences des grandes truites (en particulier des truites de lac) afin que ces dernières puissent effectivement avoir accès à leurs aires de reproduction. La survie à long terme d'espèces prioritaires au niveau national constitue l'un des objectifs de la Stratégie de Biodiversité Suisse (SBS). Ce but ne pourra être atteint que lorsque les différentes populations de truite pourront se reproduire naturellement.

La présente publication livre les bases scientifiques permettant de déterminer les débits résiduels dans les eaux abritant des truites de grandes tailles de manière effective ou potentielle. Les principes présentés ont déjà été appliqués dans certaines installations hydroélectriques et devraient être généralisés.

1.2 Problématique et mandat

Selon la LEaux, le débit résiduel minimal à maintenir dans les tronçons court-circuités doit être notamment déterminé de telle sorte que la profondeur dans le secteur à débit résiduel permette la libre migration du poisson. Cette exigence est appuyée par le message concernant la LEaux¹. D'après le message, les poissons doivent généralement disposer d'un chenal d'une profondeur d'au moins 20 cm pendant tout l'année afin de pouvoir effectuer les déplacements nécessaires à leur cycle de vie. Selon les instructions des autorités fédérales (Estoppey 2000, p. 45), ces 20 cm n'ont cependant pas de validité absolue dans la mesure où les exigences écologiques des populations piscicoles présentes sont considérées comme déterminantes. Les grandes espèces, comme par exemple les truites de lac et les grandes truites de rivière, les saumons, les barbeaux et les brèmes, pourraient nécessiter des profondeurs plus importantes.

Depuis l'entrée en vigueur, en 1991, de la réglementation relative aux débits résiduels prévue par la LEaux, la situation des espèces migratrices a beaucoup changé. L'exploitation de la force hydraulique s'est fortement développée. En même temps, beaucoup d'installations disposent aujourd'hui de dispositifs de franchissement vers l'amont. Des secteurs de cours d'eau inaccessibles aux poissons depuis des décennies sont à nouveau reconnectés (comme celui de Lavey sur le Rhône dans le Valais). La restauration de la continuité écologique du réseau hydrographique devrait se poursuivre dans les années qui viennent grâce aux assainissements en cours ou prévus selon les planifications stratégiques cantonales en matière de migration du poisson. Une attention croissante est donc accordée aux conditions dans lesquelles cette dernière peut s'effectuer dans les tronçons influencés par la force hydraulique. Il est donc temps de disposer d'un outil d'interprétation scientifique concernant les exigences écologiques liées à la libre migration entrant en compte dans la réglementation relative aux débits résiduels, notamment en ce qui concerne les grandes espèces piscicoles.

¹ Message concernant l'initiative populaire « pour la sauvegarde de nos eaux » et la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux du 29 avril 1987.

Suite à une demande concrète du canton de Glaris sur la truite lacustre, il est apparu nécessaire de définir sur des bases scientifiques les hauteurs d'eau exigées par la truite de lac et par la truite de rivière². Il importait par ailleurs d'indiquer comment calculer les débits réservés correspondants.

1.3 Démarche adoptée

Dans le cadre d'une **étude bibliographique**, une recherche a été effectuée dans la littérature scientifique en utilisant des mots-clés tels que « passage flow », « residual flow » ou « critical depth » en combinaison avec « salmo » et « trout ». Les revues suivantes ont été consultées: Journal of Fish Biology, Transactions of the American Fisheries Society, North American Journal of Fisheries Management and Fisheries. Par ailleurs, la recherche a été étendue à la littérature dite « grise » (rapports, expertises etc.) publiée en anglais, en français et en allemand. Enfin, une base de données personnelle rassemblant plus de 70'000 citations a été consultée. En complément, un bureau d'études français (IRAP, Annecy) nous a constitué un dossier comportant les documents sur lesquels repose la régulation des débits résiduels en France³.

L'étude bibliographique a soulevé toute une série de questions qui ont été soumises à des experts. Un modèle a alors été élaboré sur la base des résultats de l'étude et de **l'avis des experts** puis utilisé pour calculer les hauteurs d'eau minimales à recommander.

Nous nous sommes adressés à 16 cantons (BE, BL, GE, GL, GR, JU, NE, OW, SG, SZ, TI, TG, UR, VD, VS, ZH) pour connaître leurs pratiques en application ou prévues en matière de débits résiduels en rapport avec la truite de lac en particulier (et avec le saumon à Bâle-Campagne). Quatorze d'entre eux ont répondu. Huit cantons ont indiqué les méthodes qu'ils utilisaient pour calculer les débits minimaux à maintenir pour permettre la migration piscicole. Les résultats de l'enquête ont été évalués à l'aune de notre propre expérience et des recommandations ont été émises pour les différents cas de situation.

² Selon la liste rouge, la truite de lac est une espèce considérée comme fortement menacée. Il s'agit par ailleurs d'une espèce prioritaire au niveau national qui nécessite des mesures de conservation ciblées. La truite de rivière est, selon la liste rouge, une espèce potentiellement menacée qui est également prioritaire au niveau national mais qui ne nécessite que des mesures générales d'amélioration de son habitat (OFEV 2011).

³ En France, il n'existe pas d'indication concrète concernant la profondeur nécessaire mais on se réfère de manière générale aux exigences écologiques.

2 Bases scientifiques sur la biologie des poissons

2.1 Période de migration vers les zones de reproduction

Les salmonidés effectuent des déplacements tout au long de l'année, au moins sur de courtes distances. Les petits déplacements sont généralement liés à des changements d'habitat. Compte tenu du fait que les salmonidés occupent une grande diversité d'habitats en fonction de leur stade de développement, les possibilités de « micro-migration » sont essentielles à la survie des populations.

La migration vers les zones de reproduction en tête de bassin et le retour vers les zones de chasse attirées s'effectue souvent sur de longues distances. Chez la truite de lac, elle peut s'étendre sur plus de 100 km (comme dans le Rhin alpin par exemple). Le moment de cette migration de reproduction dépend de plusieurs facteurs et peut donc varier (Gibbins et al. 2008, Fig. 1). En règle générale, elle démarre d'autant plus tôt que la distance à parcourir est importante (Jonsson & Jonsson 2011, p. 271).

Dans la basse Dranse (affluent français du Léman), les truites de lac commencent cependant à remonter dans les affluents dès mai / juin (fait attesté par les comptages au niveau des passes à poissons) bien que les zones de reproduction ne soient distantes que de quelques kilomètres (Caudron 2010, Chasserieu & Caudron 2011). De même, la montaison dans les affluents du lac de Constance s'amorce déjà en juin (communication personnelle de P. Rey, Hydra). Dans le Rhin alpin, les truites de lac les plus précoces apparaissent en juillet / août à Reichenau, à 90 km en amont du lac. On considère cependant que dans la plupart des rivières suisses à truites de lac, les premières ne se manifestent qu'en fin d'été. La principale période de montaison s'étend ainsi d'octobre à décembre (Fig. 1).

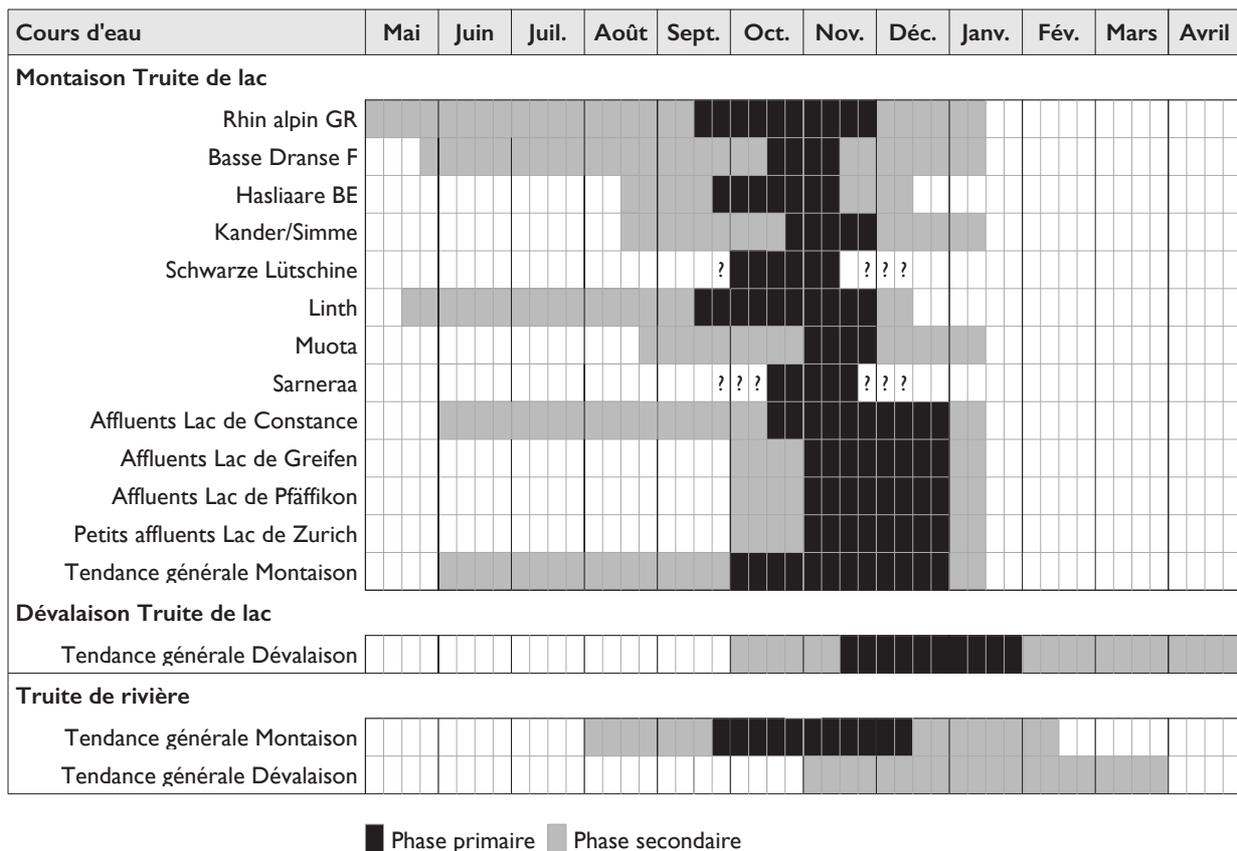


Fig. 1 Périodes approximatives de migration des truites de lac et de rivière dans certains cours d'eau et tendances générales qui en ont été déduites.

Origine des données: Inspection de la pêche BE, Abteilung Jagd und Fischerei GL, Amt für Jagd und Fischerei GR, Fischerei- und Jagdverwaltung ZH, Caudron 2010, Chasserieu & Caudron 2011, Dönni & Beffa 2011, Dönni 2012, Hydra (P. Rey).

En règle générale, les poissons redescendent les rivières dès qu'ils ont effectué leur reproduction et que le niveau d'eau est suffisant. Un séjour prolongé au niveau des frayères les expose en effet à des risques de prédation et à une perte d'énergie qui peut leur être néfaste¹ (Jonsson & Jonsson 2011, p. 388 et suivantes). Mais il semble également exister une prédisposition personnelle à un départ plus ou moins précoce. Il est ainsi possible que ceux qui arrivent plus tard sur les sites de reproduction en repartent plus tard (Rustadbakken et al. 2006). Dans le Rhin alpin, tout au plus un tiers des truites de lac reste au niveau des frayères et ne redescend qu'au printemps (communication personnelle d'A. Peter). Des détails concernant ces avis d'experts figurent à l'annexe A.

Les salmonidés sont plus vulnérables à la prédation pendant la migration et en particulier la dévalaison², notamment si les eaux sont basses (Jonsson & Jonsson 2011, p. 274). Selon certaines observations, les salmonidés choisissent de se déplacer la nuit ou au crépuscule lorsque les eaux sont basses ou limpides alors qu'ils migrent également de jour quand les eaux sont plus hautes ou plus troubles (Rustadbakken et al. 2006). Dans le Rhin alpin, les truites de lac privilégient la migration nocturne (Mendez 2007).

2.2 Influence des crues et étiages

L'idée selon laquelle les **crues** ou du moins les fortes augmentations de débit pousseraient les salmonidés à entreprendre la remontée des rivières est très répandue (entre autres: Jonsson & Jonsson 2011, p. 277 et suivantes, avis d'experts Annexe A). Dans la littérature scientifique, elle ne fait cependant pas l'unanimité. Selon les observations, la montaison peut s'amorcer aussi bien à basses qu'à hautes eaux, à débit croissant comme décroissant, à écoulement constant comme variable (entre autres: Dahl et al. 2004, Gibbins et al. 2008, Mendez 2007, Rustabakken et al. 2006).

Les observations des professionnels de terrain sont elles aussi très variables. Dans une passe à poissons de la Töss, il a ainsi été observé que le nombre de truites de rivière remontant le courant était beaucoup plus élevé après chaque crue (Aquarius 2011). Cette observation n'a pas pu être confirmée par les comptages effectués sur la Muota (Dönni & Boffa 2011). Dans la Dranse (affluent français du Léman), les turbinages réguliers favorisent la montaison des truites de lac (Caudron 2010, Chassereau & Caudron 2011). Dans le Rhin alpin, soumis à des éclusées, les distances parcourues sont maximales en situation de débits planchers (Mendez 2007). Il semble que ce soit surtout dans le cas des petits cours d'eau que les débits élevés soient favorables à la migration (Jonsson & Jonsson 2011, p. 274).

Il paraît en revanche indiscutable que les truites de lac en montaison se rassemblent en aval du cours d'eau de fraie si son accès est rendu impossible par un niveau d'eau trop faible; elles attendent alors une situation de crue et, lorsque cette dernière survient, les truites se précipitent en amont. Dans les ruisseaux de ponte eux-mêmes, il est souvent constaté que les truites peuvent attendre plusieurs jours devant un obstacle pour le franchir lorsque les eaux montent.

Les spécialistes s'interrogent donc encore sur le rôle que jouent les crues dans le déclenchement de la montaison. Gibbins et al. (2008, p. 217) supposent que le débit jugé favorable pour la migration varie d'une année et d'un cours d'eau à l'autre.

Les **étiages** peuvent retarder la migration vers les sites de reproduction et la rendre plus éprouvante. Par ailleurs, si les poissons atteignent les frayères trop tardivement, il se peut que leurs alevins manquent la période la plus favorable à leur émergence au printemps. Les étiages accroissent par ailleurs le succès de la reproduction des petits individus. Or les femelles de petite taille produisent moins

¹ Cette contrainte peut se manifester par le développement de mycoses chez les poissons affaiblis, comme cela a été observé dans la Goldach et la Steinach, deux affluents du lac de Constance situés dans le canton de Saint-Gall (communication personnelle de P. Rey, Hydra).

² Lorsqu'elles remontent les rivières, les truites de lac sont pleines d'énergie et particulièrement motivées. Elles sont alors soumises à une pression de prédation relativement faible (du moins là où les grands prédateurs sont rares). Après la ponte, elles sont très affaiblies. Si elles doivent de surcroît se dépenser pour traverser des zones sans courant lors de la dévalaison, elles sont particulièrement vulnérables aux prédateurs même peu puissants comme les corneilles ou les petits mammifères (comm. pers. P. Rey, Hydra).

d'œufs (Gibbins et al. 2008, p. 199, Jonsson & Jonsson 2011, p. 274 et suivantes et p. 504).

Des débits résiduels trop faibles peuvent ainsi conduire à un affaiblissement de la population. Il est donc important de réunir dans les cours d'eau des conditions autorisant la migration sans entraves de tous les poissons, sans pénalisation des grands individus. La hauteur d'eau minimale doit donc être déterminée en se référant aux exigences des individus les plus grands dans la population. Les conditions naturelles d'écoulement doivent toujours être également prises en compte³.

2.3 Influence de la profondeur

La profondeur nécessaire aux poissons pour se déplacer dépend directement de la quantité d'eau qui s'écoule et donc du débit de dotation⁴. Toutes les espèces piscicoles autochtones effectuent des migrations plus ou moins longues. Chez la truite de rivière et surtout la truite de lac, la migration automnale vers les frayères est particulièrement marquante. Après la ponte, les adultes redescendent vers leurs habitats habituels. En dehors de la période de fraie, des déplacements moins importants sont effectués, entre zones de chasse et zones de repos abritées par exemple.

En Suisse, la plupart des obstacles à la migration des poissons sont des ouvrages transversaux (seuils, barrages, etc.). Le déplacement du poisson est également rendu difficile par la présence de passages à faibles débits, au moins de manière intermittente. En plus des étiages naturels en périodes de sécheresse ou les infiltrations en milieu karstique, des étiages artificiels provoqués par les prélèvements d'eau (p.ex. pour l'agriculture ou la production d'électricité) peuvent également influencer sur le passage du poisson.

Pour migrer, les salmonidés comme les autres poissons, doivent pouvoir se mouvoir librement dans la masse d'eau. Afin de ne pas se blesser au contact du substrat (éraflures, pertes d'écaillés etc.), ils doivent évoluer à une certaine distance du fond. Pour se prémunir de la prédation aérienne et conserver une nage efficace, ils doivent par ailleurs se maintenir à une certaine distance de la surface. Le positionnement idéal garantit l'immersion totale de la nageoire caudale, l'organe principal de propulsion des poissons (AG-FAH 2011)⁵.

Les poissons évitent ainsi autant que possible d'avoir à sortir une partie de la dorsale de l'eau et d'entrer en contact avec le fond (Adam et al. 2010, p. 96 et suivantes, BLMFUW 2012, p. 10 et suivantes). Les passages à travers des tronçons à faible profondeur demandent une dépense d'énergie supplémentaire, peuvent causer une mortalité accrue et éventuellement aboutir à l'abandon de la migration. S'ils ne sont pas trop longs, ces passages peuvent être franchis au prix d'un sprint risqué et éprouvant.

Des études menées par Sautner et al. (1984) sur le saumon du Pacifique (*Oncorhynchus keta*) semblent indiquer que la profondeur minimale dépend de la longueur du tronçon à franchir⁶. Schwevers et al. (2004) ont montré que la truite de rivière avait besoin d'une profondeur minimale d'à peine 7 cm pour traverser des passages (buses) de 40 cm de long ou moins. Même des truites de 50 cm de long pouvaient traverser des passages à moins de 10 cm. Des études menées dans la région du lac de Constance ont par ailleurs montré que les truites de lac pouvaient dévaler sur près de 100 m dans des tronçons ne présentant que quelques centimètres d'eau (comm. pers. P. Rey, Hydra).

Les études citées dans la littérature ne permettent pas de savoir si la profondeur minimale doit être plus importante lorsque plusieurs passages de faible profondeur se succèdent (effets cumulatifs). Il paraît cependant évident que chacun de ces passages demande son tribut en énergie, énergie qui

³ Les études portant sur les débits résiduels visent notamment à constater dans quelle mesure la limitation du débit accroît les contraintes liées aux conditions hydrologiques naturelles.

⁴ En plus de la profondeur, le débit conditionne la disponibilité en habitats, en particulier pour la reproduction. Il influe par ailleurs fortement sur la nourriture disponible à travers la surface mouillée.

⁵ Des mesures effectuées sur 48 truites de lac ont montré que la largeur de la caudale naturellement déployée dépassait en moyenne de 2,6 cm la hauteur du corps du poisson. Elle était en revanche plus petite de 1 cm chez les 58 truites de rivière examinées.

⁶ Une profondeur de 13 cm est nécessaire pour un passage de moins de 3 m. Elle est de 17 cm pour 30-60 m à parcourir.

manque ensuite pour la reproduction et la dévalaison.

2.4 Autres facteurs

Il ressort de la littérature scientifique que la **vitesse du courant** joue également un rôle dans les possibilités de franchissement des passages difficiles vers l'amont. Cet aspect n'a pas été étudié en détail dans le présent document puisqu'il s'agit essentiellement de vitesses maximales tolérables fixées à une valeur relativement élevée pour les salmonidés (>1,5 m/s) et que les vitesses atteintes dans les tronçons à débit résiduel peu profonds sont généralement faibles.

La **température de l'eau** entre également en ligne de compte lorsque l'on considère les possibilités de franchissement des tronçons à débit résiduel et les performances natatoires des poissons (annexe B.2). Cet aspect peut s'avérer déterminant puisque la température est souvent influencée par les prélèvements. Ce facteur n'a cependant pas non plus été examiné ici en détail⁷.

⁷ Le module Température du système modulaire gradué permet une appréciation des conditions de température dans les tronçons à débit résiduel et de leur influence sur la faune piscicole (Dübendorfer et al. 2011).

3 La profondeur minimale

3.1 Symboles et définitions

L	Longueur totale ¹ du poisson
L _{max}	Longueur totale des poissons les plus grands sur le site
H _{max}	Hauteur des poissons les plus grands (hauteur du corps sans la nageoire dorsale)
h _{min}	Profondeur minimale
l _{max}	Longueur maximale de tronçon franchissable

3.2 Bases théoriques

Pour que leur migration ne soit ni trop risquée ni trop éprouvante, les poissons doivent se maintenir à une certaine distance aussi bien du fond que de la surface (chap. 2.3). La profondeur minimale doit donc être nettement plus élevée que la hauteur du corps des plus grands poissons susceptibles de franchir le passage concerné. En Suisse, les spécialistes se réfèrent souvent aux recommandations du canton de Saint-Gall qui préconise une profondeur de 20 cm pour la truite de rivière et de 30 cm pour la truite de lac (Aquarius 2000)². Pour les rivières à truite ne présentant pas, même dans un environnement naturel non influencé, une profondeur de plus de 20 cm sur toute leur longueur, il est recommandé d'évaluer les possibilités de franchissement par une étude spécifique sur place.

En Allemagne et en Autriche tout comme dans une partie des USA, la profondeur minimale est plutôt déterminée en se référant à la hauteur du corps de la plus grande espèce attendue qu'à des valeurs fixes. Dans leurs réflexions sur le dimensionnement des dispositifs de montaison, Adam et al. (2010, p. 97 et suivantes) estiment adéquate une profondeur minimale générale de 2,5 fois la hauteur du corps. Ce concept est repris dans le guide des autorités autrichiennes relatif à ces dispositifs (BMLFUW 2012, p. 32-33) qui précise cependant que cette profondeur ne doit jamais être inférieure à 20 cm.

Étant donné que ces valeurs s'appliquent aussi aux ruisseaux de contournement et qu'elles ont été déterminées en se référant aux caractéristiques naturelles des cours d'eau, elles sont également applicables aux tronçons à débit résiduel. Dans le Bade-Wurtemberg, il est ainsi recommandé d'appliquer une profondeur de 2 à 3 fois la hauteur du corps dans les tronçons court-circuités (Dehus 2005).

Aux États-Unis, il est souvent fait référence aux travaux de Thompson (1972) selon lesquels la profondeur minimale pour la migration de reproduction vers l'amont doit être respectivement de 12 et 18 cm pour les petites et grandes truites et de 24 cm pour les grands salmonidés. Ces valeurs correspondent à la hauteur du corps sans facteur multiplicateur (Reiser et al. 2006).

D'autres références sont indiquées dans le tableau 1 de même qu'à l'annexe B.

¹ Distance entre le bout du museau et l'extrémité de la nageoire caudale déployée.

² Il est aujourd'hui impossible de connaître les bases sur lesquelles ces chiffres ont été déterminés. Il est probable qu'il s'agisse de la hauteur du corps.

Tab. 1 Sélection de valeurs recommandées dans la littérature consultée pour la profondeur minimale à respecter pour la migration des poissons. H_{\max} = hauteur du corps des plus gros poissons.

Pays	Catégorie de cours d'eau	Espèce / Écotype	Profondeur minimale	Source	
Suisse	Tronçons à débit résiduel	Truite de rivière	20 cm	Aquarius 2000	
	Tronçons à débit résiduel	Truite de lac	30 cm	Aquarius 2000	
Allemagne	Passes à poissons	Non spécifié	$2.5 \times H_{\max}$	Adam et al. 2014	
	Rampes	Truite de rivière ou de lac	$1.5 \times H_{\max}$	Schneider 2009	
	Tronçons à débit résiduel	Non spécifié	$2-3 \times H_{\max}$	Dehus 2005	
	Tronçons à débit résiduel (profils problématiques)				
	Zone à truites	Non spécifié	10–15 cm	TLUG (2009)	
	Zone à ombres	Non spécifié	15–20 cm	TLUG (2009)	
	Zone à ombres	Grands salmonidés	30 cm	TLUG (2009)	
	Zone à barbeaux	Non spécifié	30 cm	TLUG (2009)	
	Zone à brèmes	Non spécifié	40 cm	TLUG (2009)	
Autriche	Passes à poissons	Non spécifié	$2.5 \times H_{\max}$ (min. 20 cm)	BMLFUW 2012	
	Épirhithron (pente >10%)	Non spécifié	15 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Épirhithron (pente 3-10%)	Non spécifié	20 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Épirhithron (pente <3%)	Non spécifié	25 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Méta/hyporhithron	Non spécifié	30 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Épipotamon	Non spécifié	40 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
France	Passages sous chemin	Truite de rivière	15 cm	Larinier et al. 1994	
	Passages sous chemin	Saumon / truite de mer	30 cm	Larinier et al. 1994	
États-Unis	Non spécifié	Petites truites	12 cm	Thompson 1972	
	Non spécifié	Grandes truites	18 cm	Thompson 1972	
	Non spécifié	Grands salmonidés	24 cm	Thompson 1972	
	Alaska	Tous cours d'eau	Non spécifié	$2.5 \times$ hauteur de la caudale	Hotchkiss & Frei 2007
	Maine	Tous cours d'eau	Non spécifié	$1.5 \times H_{\max}$	Hotchkiss & Frei 2007
	Californie	Tous cours d'eau	Salmonidés juvéniles	15 cm	Hotchkiss & Frei 2007
		Salmonidés adultes	30 cm	Hotchkiss & Frei 2007	

La détermination de la profondeur minimale à partir de la **hauteur du corps** des poissons rend mieux justice aux différences entre populations qu'une valeur fixe générale. Elle tient par exemple compte du fait qu'une rivière à truites de lac doit être plus profonde qu'une rivière voisine dans laquelle les truites de lac n'ont pas accès en raison d'un obstacle naturel. Elle prend également en compte le fait que les truites de rivière grandissent moins et restent plus petites dans les cours d'eau froids de la zone alpine et préalpine que dans les cours d'eau de taille similaire situés à moindre altitude. Les profondeurs à maintenir pour permettre la migration peuvent donc légitimement y être plus faibles.

La hauteur du corps des poissons présents apparaît donc comme un paramètre déterminant pour le calcul de la profondeur minimale. Il se trouve cependant que la hauteur des salmonidés dans les tronçons concernés n'est en général pas connue. Elle peut toutefois être estimée à partir de la longueur totale des plus grands individus (Fig. 3)³. D'après les données dont nous disposons, la hauteur du corps peut atteindre au maximum 22 cm chez la truite de lac et un peu plus de 16 cm chez la truite de rivière (annexe B.1).

³ Voir l'annexe D pour la définition des « plus grands poissons ».

3.3 Recommandations

3.3.1 Consignes concernant les profondeurs minimales

En matière de profondeur dans les tronçons à débit résiduel, des valeurs peuvent être recommandées pour trois cas de figure (Fig. 2). Ces valeurs se basent sur les exigences minimales des plus grandes truites de lac ou de rivière présentes ou potentiellement présentes (Chap. 2). Elles n'ont cependant de valeur qu'indicative et les profondeurs réellement pratiquées peuvent en différer légèrement si une situation particulière le justifie. Le procédé de détermination des valeurs recommandées est détaillé aux annexes B et C.

- Dans le **cas général**, un chenal continu présentant une profondeur minimale de 2,5 fois la hauteur du corps doit être maintenu dans le tronçon. Une telle profondeur permet aux salmonidés d'effectuer leur migration sans perte notable d'énergie.
- Les **hauts-fonds** sont de courts passages dans lesquels la profondeur réelle est inférieure à profondeur minimale générale en raison de la topographie naturelle du fond (dans un radier par exemple). Ces passages doivent présenter un chenal continu dont la profondeur est d'au moins 2 fois la hauteur du corps. Dans ces conditions, la migration des salmonidés est possible mais demande une dépense considérable d'énergie. La longueur de ces passages doit donc être limitée.

Les recommandations suivantes peuvent être émises pour ce cas de figure:

- La longueur du passage de haut-fond (ou de non atteinte de la profondeur minimale générale) ne doit pas dépasser cinquante fois la longueur du poisson: $l_{\max} = 50 \times L_{\max}$.
- Les passages de haut-fond plus longs ne sont pas autorisés; au-delà de cette longueur, la profondeur minimale générale doit être respectée.
- Dans certains **cas particuliers**, une profondeur minimale égale à 1 x la hauteur du corps mais d'au moins 7 cm peut être autorisée. La longueur de ces passages problématiques ne doit pas dépasser 5 m. Cette règle d'exception peut par exemple s'appliquer dans le cas de secteurs artificiels aménagés avec un substrat lisse ou d'affleurements rocheux.

La profondeur minimale est directement déduite de la hauteur maximale du corps des plus grands poissons présents. Si seule la longueur totale est connue, la figure 3 peut être utilisée.

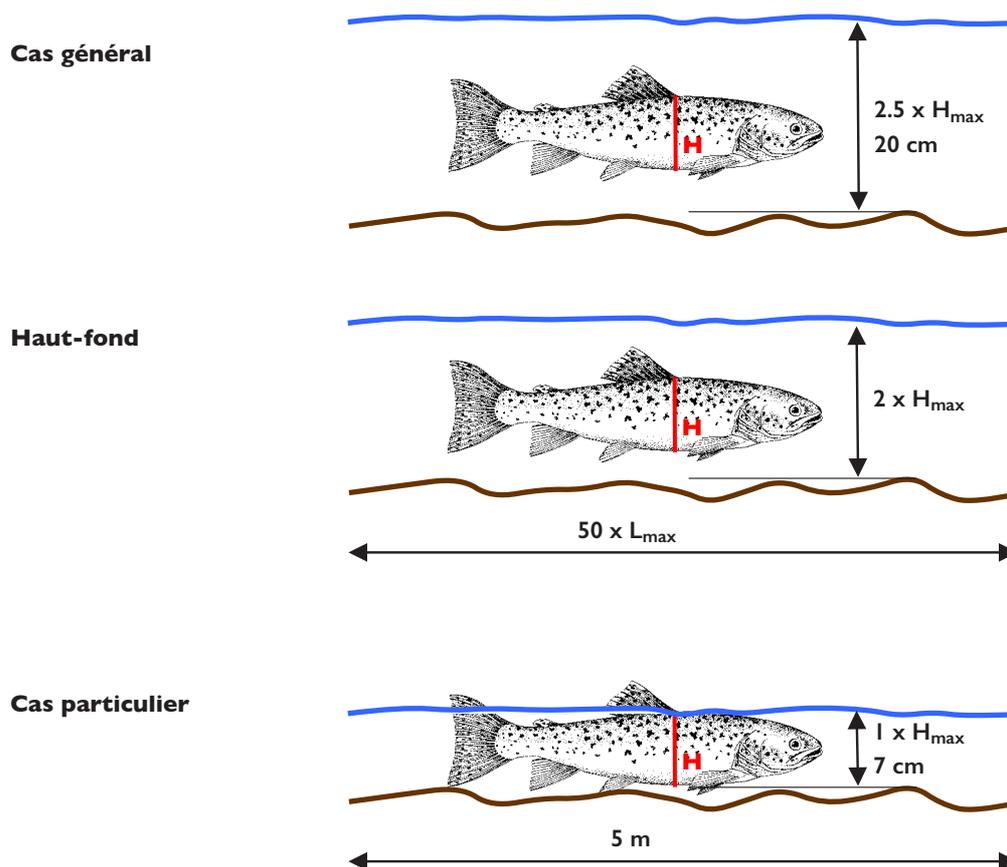
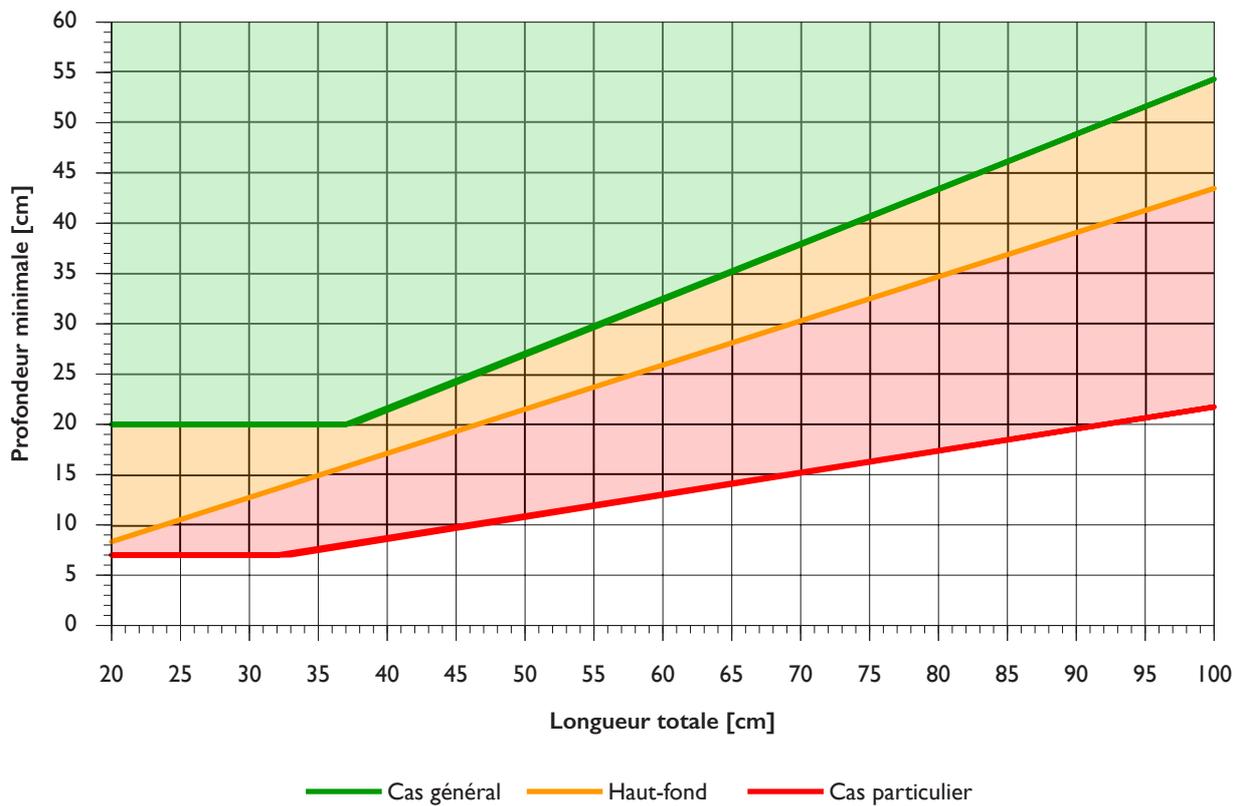


Fig. 2 Profondeurs minimales recommandées dans les tronçons à débit résiduel pour trois cas de figure et longueur maximale autorisée des passages problématiques. Graphique © B. Gysin, Hinterkappelen.

3.3.2 Autres aspects

- En période de sécheresse, il peut arriver même dans des **conditions hydrologiques naturelles** que le niveau d'eau baisse temporairement au point de rendre le passage des poissons difficile voire impossible. L'éventualité et, le cas échéant, la durée d'une dispense du respect de la profondeur minimale doivent alors être évaluées au cas par cas.
- Dans le cas de secteurs prolongés **d'affleurement de roche**, la profondeur minimale doit être déterminée de façon spécifique en tenant compte des conditions naturelles locales.
- Il est impossible de quantifier, au sein d'un même tronçon à débit résiduel, **l'effet cumulé** de plusieurs passages successifs dans lesquels la profondeur minimale générale n'est pas respectée (voir détails à l'annexe C5).



Longueur totale [cm]	Hauteur du corps [cm]	Profondeur minimale [cm]		
		<i>Cas général</i> $2.5 \times H_{\max} / \text{min. } 20 \text{ cm}$ $l_{\max} = \infty$	<i>Haut-fond</i> $2 \times H_{\max}$ $l_{\max} = 50 \times L_{\max}$	<i>Cas particulier</i> $l \times H_{\max} / \text{min. } 7 \text{ cm}$ $l_{\max} = 5 \text{ m}$
20	4.2	20	8	7
25	5.3	20	11	7
30	6.4	20	13	7
35	7.5	20	15	7
40	8.6	21	17	9
45	9.7	24	19	10
50	10.8	27	22	11
55	11.9	30	24	12
60	12.9	32	26	13
65	14.0	35	28	14
70	15.1	38	30	15
75	16.2	41	32	16
80	17.3	43	35	17
85	18.4	46	37	18
90	19.5	49	39	20
95	20.6	52	41	21
100	21.7	54	43	22

Fig. 3 Profondeurs minimales recommandées en fonction de la longueur totale des plus grands individus de truite de rivière ou de lac potentiellement présents et de la topographie amont-aval du tronçon à débit résiduel. Le calcul de la hauteur du corps à partir de la longueur totale s'effectue selon la méthode indiquée à l'annexe B.1.

4 Détermination du débit résiduel à maintenir

Afin de permettre la migration piscicole dans les tronçons court-circuités, il est impératif de déterminer le débit minimum devant y être maintenu afin de garantir la présence d'un chenal continu présentant une profondeur minimale nécessaire. Pour ce faire, des relevés doivent être effectués sur le terrain au niveau des passages critiques, à savoir bien souvent des zones du cours d'eau restées naturelles et présentant une faible déclivité et un lit étalé ou au contraire des zones artificialisées sans thalweg. Les zones de passage de la partie mouillée du chenal d'un côté à l'autre de la rivière sont alors à observer avec une attention particulière.

En Suisse, trois méthodes peuvent être utilisées pour déterminer le débit résiduel minimum (Tab. 2) dont la plus adéquate doit être choisie en fonction des circonstances. Le **degré de précision** exigé pour les données est sensiblement le même et leur qualité est comparable si les relevés sont effectués avec le même soin dans la mesure où les paramètres sont de même nature (hauteur d'eau ou cote du fond). Il faut cependant garder à l'esprit que la moindre pierre ou le moindre creux — une empreinte laissée lors d'un passage précédent et non visible dans l'eau tourbillonnée, par exemple — peut faire varier la hauteur d'eau de quelques centimètres, ce qui peut avoir une influence d'autant plus forte sur le résultat final que le nombre de mesures est faible.

Chacune des trois méthodes présente des **avantages et des inconvénients** et convient mieux à telle ou telle situation (Tab. 2). En général, les essais de dotation ne peuvent être effectués que lorsque le prélèvement d'eau a déjà lieu et que le débit résiduel est réglé via un dispositif de dotation suffisamment précis. Accompagnés de mesures de profils, ils conviennent tout particulièrement aux tronçons morphologiquement hétérogènes et fortement structurés où l'élaboration d'un modèle hydraulique demanderait une quantité de relevés disproportionnée. S'il est impossible de réaliser des essais de dotation, des mesures de profondeur doivent être effectuées le long d'un même profil à différents débits d'étiage. La modélisation 2D convient particulièrement aux tronçons peu structurés.

Si les passages critiques ne peuvent être parcourus à pied, même à basses eaux, et si les mesures ne peuvent pas non plus être effectuées à partir d'un bateau, le principe de précaution doit être appliqué. Un débit résiduel est alors estimé avec une certaine marge à partir d'expertises. Il pourra ensuite être réévalué puis éventuellement corrigé lorsque le projet sera en route.

De l'avis des experts interrogés, la mesure des profondeurs sur **profils en travers** est la pratique la plus couramment choisie par les cantons (Annexe A). Elle présente l'avantage, par rapport à la mesure sur **profils en long**, de fournir des indications sur la largeur du lit mouillé. Les profils transversaux ne livrent cependant qu'un seul point de mesure sur le sillon pouvant être emprunté par le poisson en migration. Un passage critique exigera donc des relevés sur de nombreux profils en travers. Les profils en long présentent l'avantage d'être plus parlants en termes de possibilités de migration puisqu'ils livrent beaucoup plus de points de mesure.

Un autre inconvénient des profils transversaux est qu'ils doivent être marqués précisément sur le terrain pour que les mesures puissent être répétées exactement au même endroit à des débits différents. Dans le cas des profils longitudinaux, cette disposition n'est pas nécessaire car le sillon le plus profond est généralement bien identifiable et qu'il peut, qui plus est, se déplacer en fonction des débits.

Dans les cours d'eau artificialisés et dont le fond a été aplani, il est souvent impossible d'identifier un quelconque sillon. Dans les tronçons larges, en particulier, il peut alors être difficile de distinguer le point le plus profond du profil transversal. Il en va de même pour les cours d'eau de grande largeur présentant plusieurs chenaux parallèles qui peuvent par ailleurs finir en cul-de-sac. Ces situations, problématiques pour le gestionnaire, s'avèrent tout aussi problématiques pour les poissons.

Tab. 2 Méthodes habituellement utilisées en Suisse pour déterminer les débits résiduels à maintenir pour assurer une profondeur minimale suffisante pour la migration piscicole.

Méthode	Principe	Relevés exigés sur le terrain	Avantages	Inconvénients	Situations convenant à la méthode
Essais de dotation	Des mesures sont effectuées à différents débits de dotation appliqués de façon contrôlée dans le tronçon à débit résiduel	<ul style="list-style-type: none"> Mesure de la profondeur sur profils en long et en travers et dans les passages critiques Mesures de débit 	<ul style="list-style-type: none"> Techniquement facile à mettre en œuvre et facile à interpréter 	<ul style="list-style-type: none"> Les mesures ne peuvent être effectuées que pendant les essais de dotation et les résultats ne sont valables que pour les débits de dotation testés. Plus le tronçon court-circuité est long, plus le temps demandé pour chaque débit est important (temps d'attente jusqu'à stabilisation du nouveau débit). Difficulté de mesurer la profondeur au point le plus bas du profil transversal (profil longitudinal) dans les tronçons sans thalweg bien visible. Difficulté de relever tous les points critiques dans le profil transversal. 	<ul style="list-style-type: none"> Possible uniquement au niveau des prises d'eau existantes. Uniquement dans les tronçons pouvant être parcourus à pied au débit de dotation. Bien adaptée aux chenaux très hétérogènes riches en rochers, bois morts, végétation et autres éléments structurants. Chenaux très ramifiés.
Modèle hydraulique 2d	Mesurage du tronçon à basses eaux et élaboration d'un modèle topographique. Élaboration d'un modèle hydraulique en 2d permettant de calculer la profondeur, la vitesse moyenne du courant et la direction du courant pour un point et un débit quelconque donné.	Mesurage détaillé du niveau du lit et des pieds de berges de l'ensemble du canal à l'aide d'un théodolite ou d'un radar (LIDAR). Dans les tronçons critiques en termes de profondeur: mesure de profils transversaux, analyse de granulométrie et de débit pour calibrer le modèle.	<ul style="list-style-type: none"> Simulation de la profondeur et de la vitesse moyenne d'écoulement pour tout débit. D'où possibilités d'études complémentaires. Simulation de la profondeur et de la vitesse moyenne d'écoulement sur tout le tronçon. D'où possibilités de calcul de tout profil en long et de la surface mouillée. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût des équipements de mesurage et du logiciel de modélisation. Travail important demandé pour le mesurage des cours d'eau hétérogènes (nombre élevé de points de mesure) et en terrain accidenté (déplacement fréquent du théodolite). Les tronçons examinés tendent à être plus courts qu'avec les autres méthodes. Le mesurage, la construction du modèle et la simulation doivent être effectués par des entreprises spécialisées. 	<ul style="list-style-type: none"> Cours d'eau pouvant être parcourus à pied à basses eaux. Convient mieux aux cours d'eau homogènes ou peu hétérogènes à substrat sableux ou graveleux assez monotones (pauvres en pierres, rochers et autres petites structures).
Relevés au débit d'étiage	La profondeur est mesurée à différents débits d'étiage et, si possible, en conditions de débit moyen dans des passages représentatifs et critiques.	Mesure de la profondeur le long de profils en travers et en long dans les tronçons critiques vis-à-vis de profondeur.	<ul style="list-style-type: none"> En principe, facilité de réalisation des mesures et d'interprétation des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> Demande du temps puisque les mesures doivent être effectuées à différents débits de basses eaux dans le futur tronçon à débit résiduel. Le débit résiduel à venir est souvent si bas qu'il n'est jamais atteint dans le tronçon non influencé, même à basses eaux. Difficulté de mesurer la profondeur au point le plus bas du profil transversal (profil longitudinal) dans les tronçons sans thalweg bien visible. Difficulté de préciser la position des profils en travers sur la durée. 	<ul style="list-style-type: none"> Étiages dans la future zone à débit résiduel. Cours d'eau pouvant être parcourus à pied à basses eaux.

Les **modèles hydrauliques en 2d** livrent en revanche une excellente base d'informations sur toute la largeur du chenal qui permet d'obtenir un profil en long en suivant la ligne de profondeur maximale (Fig. 4). Par ailleurs, la surface mouillée peut être simulée et visualisée pour différents débits. En Suisse, les modèles en 2d sont de plus en plus utilisés pour traiter des questions touchant aux débits résiduels. Ils font cependant encore l'objet d'un grand scepticisme de la part de certains (Annexe A) tandis qu'ils sont largement utilisés depuis des années dans certains domaines comme celui des constructions hydrauliques.

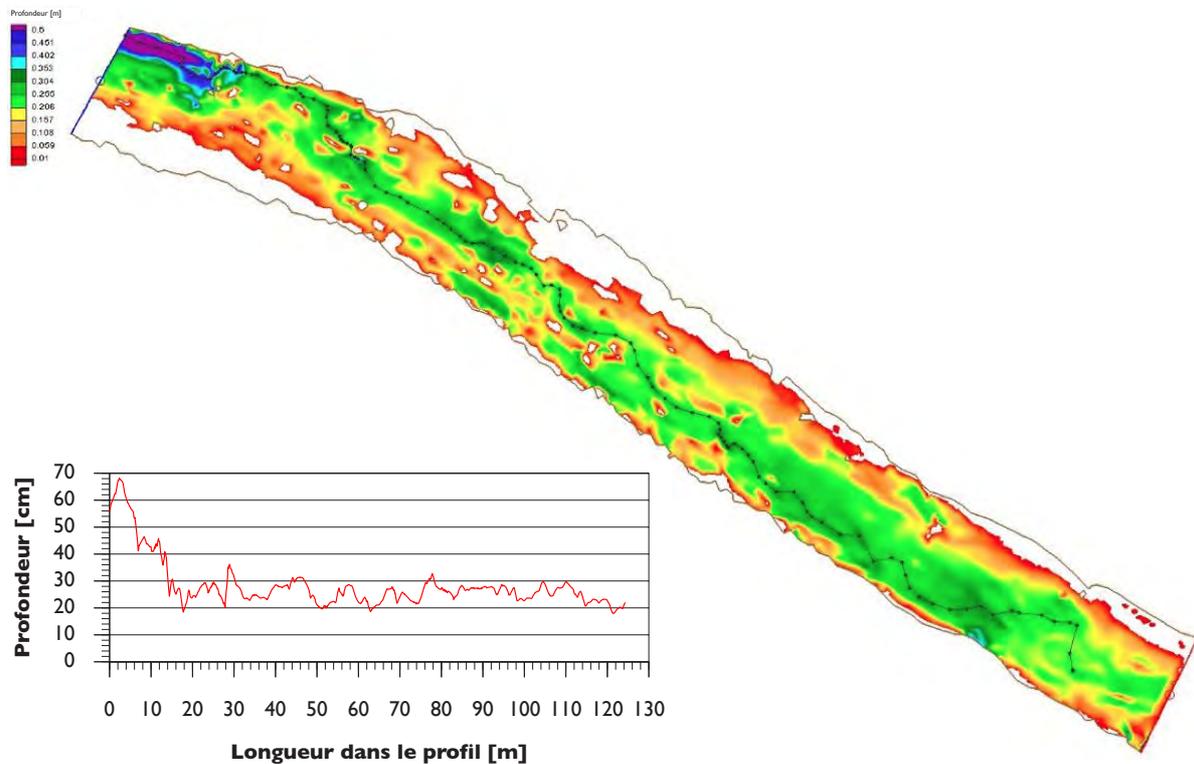


Fig. 4 Simulation 2d de la profondeur dans un tronçon de la Simme (en haut) et profil en long correspondant calculé en suivant les points de profondeur maximale (en bas à gauche). Le tracé du profil en long est indiqué par la ligne noire à points (Données IDREL SA, Baar).

De façon générale, les experts interrogés estiment que les méthodes décrites suffisent aux besoins. Un responsable cantonal a fait remarquer qu'il ne suffit pas de mesurer la profondeur mais qu'il conviendrait de vérifier, par des essais de marquage, que les passages concernés soient réellement franchissables. Ce travail supplémentaire se justifie certainement dans les cours d'eau particulièrement importants sur le plan piscicole.

5 Marche à suivre et exemple d'application

1. Les données biométriques des plus grands salmonidés doivent être relevées dans le cadre d'une **pêche électrique**. La longueur est mesurée du bout du museau à l'extrémité de la caudale naturellement déployée (longueur totale) et la hauteur du corps à l'avant de la dorsale. Les dimensions doivent être mesurées au millimètre près, une estimation étant jugée insuffisante.

Dans l'impossibilité d'une pêche électrique, les renseignements relatifs à la taille des plus grands individus peuvent généralement être obtenus auprès des gardes-pêche ou des gestionnaires ayant accès aux données de relevés précédents ou de captures de reproducteurs sauvages. En l'absence de toute information exploitable, des données issues de cours d'eau comparables situés dans le voisinage peuvent éventuellement être utilisées.

2. Partant de la hauteur du corps maximale ou de la longueur totale maximale, la profondeur minimale est calculée pour le cas général, pour les hauts-fonds et pour les cas particuliers (Fig. 2, Fig. 3). L'occurrence de situations exceptionnelles au sens de l'annexe C.3 est estimée pour la totalité du tronçon à débit résiduel.
3. Dans les passages critiques du tronçon résiduel, la profondeur est mesurée à différents débits le long de la ligne continue de profondeur maximale ou calculée par modélisation 2d (Chap. 4).
4. Les valeurs de profondeur déterminées pour le cas général et pour les hauts-fonds sont inscrites sur le profil en long. Le nombre et la longueur des zones dans lesquelles la profondeur est inférieure à ces valeurs sont relevés pour chaque débit. Si des passages particulièrement critiques correspondant à des cas particuliers apparaissent, une profondeur absolument minimale est également retenue pour chaque débit.

Les figures 5 et 6 présentent un exemple d'analyse de profil en long en regard de la profondeur minimale nécessaire pour un cours d'eau abritant des truites de lac d'une taille maximale de 60 cm. À un débit de 700 l/s, la profondeur est inférieure sur deux grands secteurs avec une profondeur de 34 cm déterminée pour le cas général (= 2 zones de haut-fond s'étendant respectivement sur 14,5 et 94,5 m de long). La longueur maximale tolérable de ces hauts-fonds est de 30 m (50 x 60 cm). Par ailleurs, la profondeur est inférieure à la profondeur minimale définie pour les hauts-fonds, à savoir 27 cm, à 17 endroits. Le débit doit donc être augmenté.

À 800 l/s, la situation est quasiment inchangée. Ce n'est qu'à 1'000 l/s que toutes les zones de haut-fond s'étendent sur moins de 30 m. Il persiste cependant 9 zones sur lesquelles la profondeur est inférieure à la profondeur minimale définie pour les hauts-fonds. Étant donné qu'une telle situation n'est tolérée que de façon exceptionnelle, le débit doit encore être augmenté. À 1'500 l/s, il reste encore 14 points de hauts-fonds mais ils respectent la profondeur minimale de 27 cm. Ces calculs indiquent donc que le débit résiduel doit être d'au moins 1'500 l/s. En affinant l'analyse à des débits compris entre 1'000 et 1'500 l/s, il est cependant probable que l'on puisse obtenir un débit résiduel recommandé inférieur à cette valeur.

Le procédé décrit permet d'obtenir une valeur chiffrée du débit résiduel nécessaire à la migration du poisson. Dans chaque cas, cette valeur doit faire l'objet d'une analyse de plausibilité.

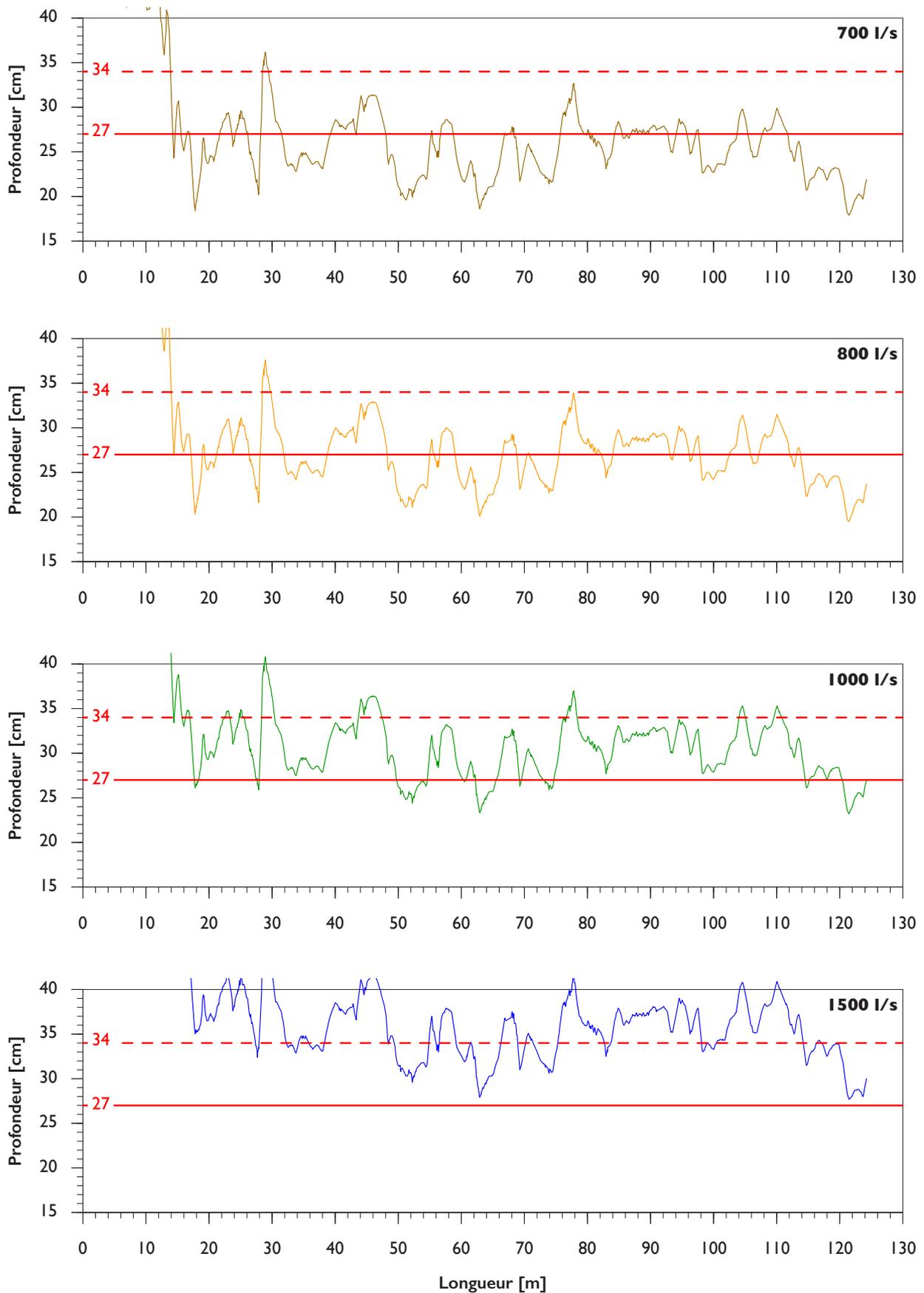


Fig. 5 Exemple théorique: profondeurs enregistrées à différents débits le long de la ligne de plus grande profondeur. Signalisation des profondeurs minimales (34 cm) et des profondeurs minimales pour les hauts-fonds (27 cm) pour la truite de lac (longueur totale maximale = 60 cm).

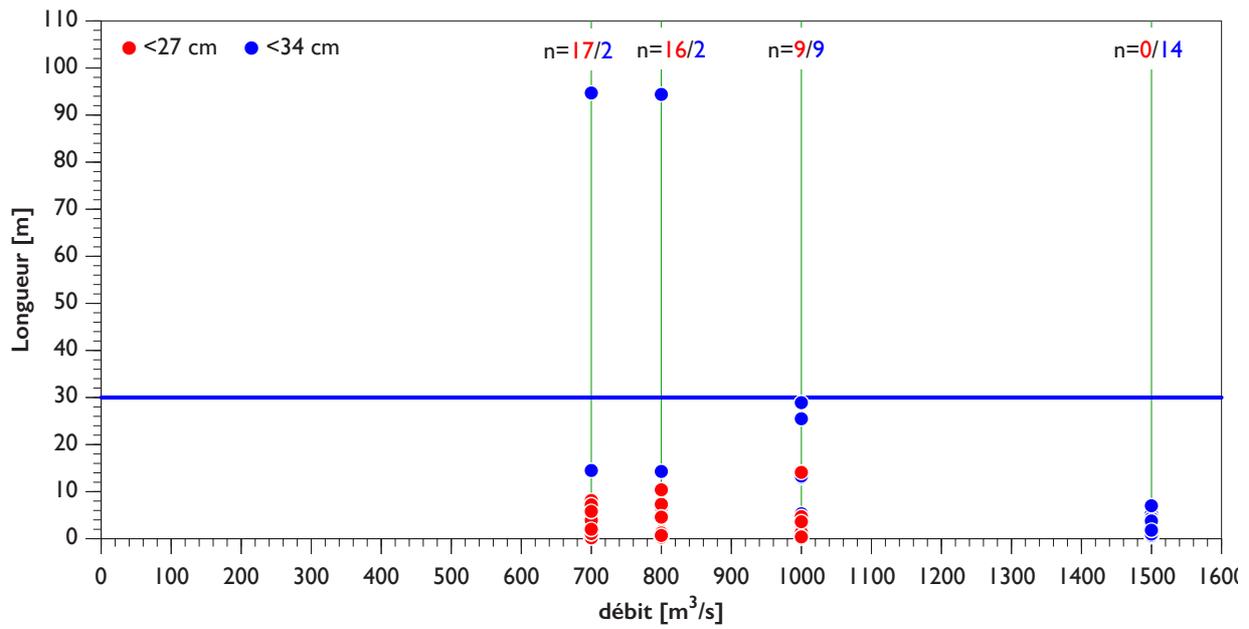


Fig. 6 Fréquence et longueur des non-respects des profondeurs générales et, en cas de hauts-fonds, le long du sillon du chenal pour différents débits. Signalisation des longueurs maximales des hauts-fonds franchissables (ligne bleue).

Aide à la lecture: les exigences en matière de libre circulation du poisson sont respectées lorsqu'aucun point rouge n'apparaît et qu'aucun point bleu ne se situe au-dessus de la ligne bleue.

6 Périodes particulières

6.1 Saison

Lors de la détermination du débit réservé, une dotation plus élevée est souvent exigée pendant la période de fraie afin que les poissons en montaison aient la possibilité d'atteindre les frayères et de se déplacer entre les sites de reproduction et les caches. En dehors de cette période de reproduction, il serait cependant judicieux de tenir compte du temps nécessaire à la migration vers l'amont et vers l'aval si l'on envisage de moduler les débits réservés en fonction de la saison. Pendant la dévalaison qui suit la fraie, notamment, les poissons épuisés sont particulièrement tributaires de profondeurs suffisantes pour échapper aux prédateurs.

En regard des faits exposés au chapitre 2.2 et de multiples observations, un calendrier des périodes générales de migration de reproduction a été établi pour la truite de rivière et la truite de lac (Fig. 2). Il peut être utilisé en tenant compte des particularités régionales et des variations possibles d'une année à l'autre. Dans le cas de la truite de lac, on peut toutefois considérer que la migration a lieu tout au long de l'année.

Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, rien ne permet encore de savoir si une augmentation subite de débit est nécessaire pour déclencher la montaison (Chap. 2.2).

6.2 Moment de la journée

Pendant leur migration, les salmonidés s'exposent à un risque accru de prédation. Lorsque l'eau est limpide, ils préfèrent donc se déplacer de nuit et passer la journée à l'abri (Chap. 2.1). Dans l'état actuel des connaissances sur les variations de l'activité migratoire des salmonidés en fonction des heures du jour ou de la nuit, il est aujourd'hui très difficile de définir un rythme nyctéméral des débits qui soit adapté aux conditions locales, qui garantisse une bonne migration des poissons et qui ne cause pas d'effets similaires aux éclusées. Un tel régime de dotation ne doit donc être envisagé qu'exceptionnellement, lorsque, par exemple, la modification (permanente) du débit résiduel qui serait nécessaire aurait des conséquences économiques démesurées qui ne pourraient être dédommagées par le canton¹.

7 Exemples

L'enquête menée auprès des cantons a montré qu'à l'heure actuelle, seul un régime de débits résiduels a été spécifiquement adapté aux besoins de la truite lacustre (Muota SZ). Nous n'avons personnellement connaissance que d'un seul autre projet de ce type non encore décidé (Linth GL).

¹ Un tel régime est actuellement pratiqué dans la Muota (SZ) (Dönni & Beffa 2011). Son bénéfice pour la truite lacustre n'est pas encore démontré.

8 Références bibliographiques

- Adam, B., Bosse, R., Dumont, U., Göhl, C., Görlach, J., Heimerl, S., Kalusa B., Krüger, F., Redeker, M., Schwevers, U., Sellheim, P. (2014) Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), DWA-M 509, 334 p.
- Adam, B., Lehmann, B. (2011) Ethohydraulik. Grundlagen, Methoden, Erkenntnisse. Springer, Heidelberg, 351 p.
- AG-FAH (2011) Grundlagen für einen österreichischen Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (FAHs). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 87 p.
- Aquarius (2000) Beurteilungshilfe für die Erhöhung der Restwassermenge nach Art. 31 Abs. 1 GSchG und aufgrund fischereilicher Aspekte nach Art. 32 Abs. 2 GSchG. Amt für Umweltschutz und Amt für Jagd und Fischerei des Kantons St. Gallen, 21 p.
- Aquarius (2011) Fischaufstiegshilfe KWKW Hard: Biologische Erfolgskontrolle, Kurzbericht im Auftrag der Gemeinschaft Hard AG, Winterthur.
- BAFU (2011) Liste der National Prioritären Arten. Arten mit nationaler Priorität für die Erhaltung und Förderung, Stand 2010. BUWAL, Umwelt-Vollzug 1103, 132 p.
- BMLFUW (2012) Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 102 p.
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2011).
- Bundesgesetz über die Fischerei (BGF) vom 21. Juni 1991 (Stand am 1. August 2010).
- Caudron, A. (2010) Suivi annuel de la migration des géniteurs de truite lacustre au piège de Vongy sur la Basse Dranse, campagne 2009/2010 et comparaison avec la campagne 1999/2000. Rapport SHL 296.2010 / FDP74.10/06, 16 p.
- Chasserieu, C., Caudron, A. (2011) Suivi pluri-annuel de la population de truite lacustre sur la basse Dranse. Campagne 2010. Rapport SHL 303.2011 / FDP74./04.
- Dahl, J., Dannewitz, J., Karlsson, L., Petersson, E., Löf, A., Ragnarsson, B. (2004) The timing of spawning migration: implications of environmental variation, life history, and sex. *Canadian Journal of Zoology* 82, 1864-1870.
- Dehus, P. (2005) Anforderungsprofile von Indikator-Fischarten. In: LfU (Hrsg.) Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken – Grundlagen, Ermittlung und Beispiele. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 97, 125-153.
- Dönni (2012) Fischpass Kraftwerk Sarneraa. Aufstiegskontrolle 2010/2011 und Funktionsbewertung. Kraftwerk Sarneraa AG, 32 p.
- Dönni, W., Beffa, C. (2011) Fortpflanzungserfolg der Seeforelle in der Muota. Umsetzung der Massnahmen. Elektrizitätswerk des Bezirks Schwyz AG, 40 p.
- Dönni, W., Spalinger L., Knutti A. (2017) Erhaltung und Förderung der Wanderfische in der Schweiz – Zielarten, Einzugsgebiete, Aufgaben. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, 53 p.
- Dübendorfer, C., Moser, D., Kempfer, T., Egloff, L., Müller, V., Wanner, P., Kirchofer, A., Baumann, P. (2011) Rapport d'experts en vue d'un module Température pour le système modulaire gradué. OFEV, 95 p.
- Ebel, G. (2013) Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4, 483 p.
- Estoppey, R., Kiefer, B., Kummer, M., Lagger, S., Aschwanden, H. (2000) Débits résiduels convenables - Comment peuvent-ils être déterminés ? OFEV, L'environnement pratique UV-2701-f, 142 p.

- Gibbins, C., Shellberg, J., Moir, H., Soulsby, C. (2008) Hydrological influences on adult salmonid migration, spawning, and embryo survival. *American Fisheries Society Symposium* 65, 195-223.
- Hotchkiss, R. H., Frei, C. M. (2007) Design for fish passage at roadway-stream crossings: synthesis report. U.S. Department of Transportation FHWA-HIF-07-7033, 280 p.
- Jonsson, B., Jonsson, N. (2011) Ecology of Atlantic Salmon and Brown Trout – Habitat as a Template for Life Histories. Springer, Fish and Fisheries Series 33, 708 p.
- Katopodis, C., Gervais, R. (2016) Fish swimming performance database and analyses. DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2016/002, 550 p.
- Larinier, M., Porcher, J. P., Travade, F., Gosset, C. (1994) Passes à poissons. Expertise, conception des ouvrages de franchissement. Conseil supérieur de la pêche, Paris, 336 p.
- Mendez, R. (2007) Laichwanderung der Seeforelle im Alpenrhein. Diplomarbeit ETH Zürich, 70 p.
- Message concernant la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux FF (1987) II p. 156.
- OFEV (2011) Liste des espèces prioritaires à l'échelle nationale. Espèces prioritaires pour la conservation au niveau national, état 2010. OFEV, L'environnement pratique UV-1103-F, 132 p.
- QZV Ökologie OG (2010) 99. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des ökologischen Zustandes für Oberflächengewässer (Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 60 p.
- Reiser, D. W., Huang, C.-M., Beck, S., Gagner, M., Jeanes, E. (2006) Defining flow windows for upstream passage of adult anadromous salmonids at cascades and falls. *Transactions of the American Fisheries Society* 135, 668-679.
- Rustadbakken, A., L'Abée-Lund, J. H., Arnekleiv, J. V., Kraabøl, M. (2004) Reproductive migration of brown trout in a small Norwegian river studied by telemetry. *Journal of Fish Biology* 64, 2-15.
- Sautner, J. S., Vining, L. J., Rundquist, L. A. (1984) An evaluation of passage conditions for adult salmon in sloughs and side channels of the middle Susitna River. Alaska Department of Fish and Game, 146 p.
- Schneider, J. (2009) Ökologische Vorgaben für Sohlgleiten. In: Naturnahe Sohlgleiten, DWA-Themen, p. 29-49.
- Schwevers, U., Schindehütte, K., Adam, B., Steinberg, L. (2004) Zur Passierbarkeit von Durchlässen für Fische. Untersuchungen in Forellenbächen. LÖBF-Mitteilungen, 37-43.
- Thompson, K. E. (1972) Determining streamflows for fish life. In: Proceedings of the Instream Flow Requirement Workshop. Pacific Northwest River Basins Commission, Portland, Oregon, p. 31-50.
- TLUG (2009) Fachliche Anforderungen zur Herstellung der Durchgängigkeit in Thüringer Fließgewässer. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie 13 p. + Anhang.

Annexes

A Enquête auprès des experts cantonaux

Question	Réponse
Quelle profondeur exigez-vous globalement pour la truite lacustre ?	<i>Expert A</i> >30-35 cm
	<i>Expert B</i> L'idéal serait 50 cm au minimum (valeur empirique pour l'instant).
	<i>Expert C</i> 40 cm
	<i>Expert D</i> 20 à 50 cm
	<i>Expert E</i> Nous ne sommes pas confrontés avec des tronçon problématiques a cause des débits résiduels.
	<i>Expert F</i> 20 cm. Toutefois, au vu de l'hétérogénéité du lit de la rivière et de la difficulté de mesurer cette profondeur de manière objective, on recommande souvent une tranche 15-25 cm.
	<i>Expert G</i> Dans les rivières d'une certaine taille, nous appliquons en général la règle des 20 cm.
	<i>Expert H</i> Difficile à dire. D'après le DWA, ce serait 2,5 fois la hauteur du corps. Ce n'est probablement pas si mal.
	<i>Expert I</i> 2 fois la hauteur du corps maximale.
Quelle profondeur exigez-vous globalement pour la truite de rivière (fario) ?	<i>Expert A</i> >20 cm
	<i>Expert B</i> 20–30 cm (valeur empirique pour l'instant).
	<i>Expert C</i> En général 20 cm. Dans les cours d'eau alpins d'altitude où la plupart des poissons de mesure ou des reproducteurs ne dépassent pas les 22 cm, cette règle peut être assouplie en définissant un couloir de migration de moins de 20 cm de profondeur. Cela s'observe aussi souvent dans les cours d'eau non influencés.
	<i>Expert D</i> 20 à 30 cm
	<i>Expert E</i> Ce qui aide le plus, c'est appréciation visuelle d'ensemble !
	<i>Expert F</i> Idem.
	<i>Expert G</i> Dans les rivières d'une certaine taille, nous appliquons en général la règle des 20 cm.
	<i>Expert H</i> Nous appliquons la même règle, à savoir 2,5 fois la hauteur du corps.
	<i>Expert I</i> 20–25 cm

Question	Réponse
La présence de courts passages (dans des radiers par exemple) dont la profondeur est inférieure à la profondeur exigée est-elle admissible ?	<i>Expert A</i> Oui.
	<i>Expert B</i> Oui.
	<i>Expert C</i> Oui. En plus du cas particulier cité plus haut, c'est également admissible dans les cours d'eau soumis à la règle des 20 cm.
	<i>Expert D</i> Oui.
	<i>Expert E</i> Dans les torrents, la morphologie est toujours complexe et il est inévitable qu'il y ait des endroits ou des passages « à sauter ».
	<i>Expert F</i> Oui, bien entendu en fonction de la morphologie du lit. Le kill critère doit être « assurer les déplacements de la faune piscicole toute l'année ».
	<i>Expert G</i> En raison de mes propres observations, je pense personnellement - et officieusement - que de courts passages de faible profondeur (comme dans des radiers) ne sont pas réellement problématiques pour la migration de la truite (7-15 cm). Il est cependant difficile de traduire ce sentiment dans des chiffres (longueur, profondeur). Cela dépend totalement de la situation et du cours d'eau.
	<i>Expert H</i> Sur de très faibles distances, c'est probablement acceptable. Mes observations sur les saumons du Pacifique vont dans ce sens: lors de leur migration vers l'amont, ils sont capables de franchir des passages d'une dizaine de mètres dont la profondeur est du même ordre que la hauteur de leur corps. Les poissons y arrivent s'ils le veulent. Mais je pense que cela ne doit pas être la règle. Il vaut mieux s'en tenir à 2 x la hauteur du corps sur 5-10 m.
<i>Expert I</i> Oui, sur de courtes distances, c'est acceptable. Mais en dehors des passages de faible profondeur, il faut maintenir des débits suffisants au niveau des chutes et obstacles naturels pour que les poissons puissent remonter le courant sans dépense d'énergie trop importante. La nature de l'obstacle et la taille de la mouille sont alors décisifs. La truite doit pouvoir accélérer suffisamment et le courant d'appel ne doit pas s'accompagner d'un angle trop raide (45° dans l'idéal).	
Si oui, sur quelle longueur maximale et jusqu'à quelle profondeur ?	<i>Expert A</i> Pas de valeurs absolues, évaluations quantitatives au cas par cas.
	<i>Expert B</i> 10 mètres au plus.
	<i>Expert C</i> Nous nous référons à la vitesse maximale de la truite de rivière en situation de sprint. Nous considérons qu'un sprint permet à la truite de franchir de courts passages qui ne présentent pas la profondeur idéale de 20 cm déterminée pour les vitesses habituelles de migration (vitesse de croisière ou vitesse soutenue). On peut en effet souvent observer des truites traversant des zones peu profondes avec le dos sortant à moitié de l'eau. En chiffres, cela signifie que le couloir de migration peut occasionnellement présenter des passages à moins de 20 cm franchissables par des sprints de 1 à 2 secondes. En termes de longueur, cela correspond à 10-20 fois la longueur du corps, soit 2,5 à 5 m pour une cours d'eau à truites de 25 cm. Jusqu'à présent, nous n'avons cependant jamais eu à tolérer d'exceptions à moins de 15 cm dans des cours d'eau où la hauteur d'eau standard était fixée à 20 cm.
	<i>Expert D</i> Lacustre 30 cm sur 30 m, Fario 15 cm sur 10 m.
	<i>Expert F</i> Longueur non définie, profondeur = 15 cm (mais encore une fois, c'est très théorique!).

Question	Réponse
	<p><i>Expert H</i> La DWA préconise une profondeur minimale de 20 cm ou de 2,5 fois la hauteur du corps et, dans certains passages très brefs, 2 fois la hauteur du corps. Des profondeurs inférieures sont à éviter autant que possible. Des valeurs légèrement inférieures sur moins de 5 m seraient cependant tolérables mais ce serait contraire aux préceptes de la DWA.</p> <p><i>Expert I</i> Les truites sont en mesure de franchir de courtes distances dont la profondeur est inférieure à la hauteur du corps mais au prix d'une grande dépense d'énergie. Chez la truite de lac, ces passages ne doivent pas dépasser 10 m.</p>
<p>Pour quelle période faut-il augmenter le débit de dotation pour la truite de lac (montaison, dévalaison) ?</p>	<p><i>Expert A</i> De fin août à fin janvier; pas d'augmentation de la dotation pour la dévalaison jusqu'à présent.</p> <p><i>Expert B</i> Montaison: octobre – janvier</p> <p><i>Expert C</i> D'après notre expérience avec la truite du lac de Constance à Reichenau: de juillet à décembre (les premières truites remontent en juillet/août, les tardives à partir de septembre avec un pic en octobre/novembre). La dévalaison est observée de décembre à mars.</p> <p><i>Expert D</i> Septembre à décembre.</p> <p><i>Expert E</i> La montée des truites de lac peut commencer assez tôt (juillet-août) si l'hydrologie le permet. En général août-septembre.</p> <p><i>Expert F</i> Montaison (août-déc.) = légère augmentation du débit de dotation, le débit est très fortement influencé par l'existence d'une passe à poissons et son dimensionnement. Dévalaison = débit de dotation plus important, souvent lié à la nature des ouvrages de dévalaison, mais il est accepté (au cas par cas) que la dévalaison ne fonctionne pas en continu toute l'année -> le suivi biologique permet d'ajuster les plages + importantes des débits.</p> <p><i>Expert G</i> Principale période de montaison: novembre - décembre.</p> <p><i>Expert H</i> La remontée de non reproducteurs est toujours possible. La migration de reproduction s'amorce dès l'été (juin-juillet) et dure jusqu'à environ fin novembre. La descente à partir des frayères peut avoir lieu de la mi-octobre jusqu'au printemps. Pic juste après la fraie; certains poissons (un tiers tout au plus) restent à proximité de la frayère jusqu'au printemps.</p> <p><i>Expert I</i> Toute l'année dans les grands cours d'eau, de septembre à février dans les petits. L'importance de la profondeur ou de la dotation pendant la dévalaison est probablement sous-estimée. Trop peu d'attention leur est accordée. Après la fraie, les truites sont souvent épuisées et particulièrement vulnérables. Elles ne sont presque plus en mesure de franchir les passages peu profonds.</p>

Question	Réponse
Quelles sont les méthodes utilisées dans votre canton pour déterminer le débit de dotation suffisant pour la migration piscicole (mesures de profondeur sur profils en travers, mesures sur profils en long, modélisation 2d, combinaisons, autres) ?	<i>Expert A</i> Essais de dotation, mesures de profondeur sur profil en travers, HEC-RAS
	<i>Expert B</i> Aucune pour l'instant.
	<i>Expert C</i> Toutes les méthodes évoquées. Nous faisons de plus en plus appel à la modélisation 2d des tronçons à profondeurs critiques (plats).
	<i>Expert D</i> Profils en travers répétés dans différents secteurs de sensibilités différentes et à différents débits. Cartographie du tronçon concerné selon les différents degrés de sensibilité et pondération en fonction des résultats des mesures de profils.
	<i>Expert E</i> Pas d'expériences.
	<i>Expert F</i> Le plus souvent essais <i>in situ</i> avec lâchers de différents débits et mesures de profondeur sur profils en travers. Parfois, on a eu recours à des modélisations 2-3d mais les résultats sont souvent décevants car trop théoriques.
	<i>Expert G</i> Le requérant est tenu de mesurer les débits à l'aide d'essais de dotation et de prouver le bon respect des débits exigés (centrales existantes).
	<i>Expert H</i> Il est probablement inutile de recourir à des modèles sophistiqués étant donné l'importance des incertitudes. Un modèle simple basé sur les mesures de profils est certainement suffisant.
	<i>Expert I</i> Mesures de la profondeur sur profils en long et/ou modélisation 2d des débits.
Ces méthodes sont-elles suffisantes ? Si elles ne le sont pas, qu'attendez-vous de la méthode idéale ?	<i>Expert A</i> Elles sont suffisantes pour le moment. La modélisation est parfois entachée d'une grande incertitude.
	<i>Expert B</i> Non. Télémétrie pour les géniteurs et PIT-Tag pour la dévalaison des juvéniles.
	<i>Expert C</i> Jusqu'à présent, ces principes et méthodes nous ont bien convenu.
	<i>Expert D</i> En général, elles donnent satisfaction.
	<i>Expert F</i> Je pense raisonnablement que la meilleure méthode consiste à tester les débits sur le terrain, par débit d'étiage. En outre, il pourrait être utile de disposer d'un protocole méthodologique que l'on ferait appliquer systématiquement sur tous les cours d'eau (par souci d'uniformisation des pratiques).

B Profondeurs minimale: bases scientifiques

B.1 Profondeur minimale et hauteur du corps

Pour que la migration des poissons s'effectue sans entrave, il faut qu'elle n'entraîne pas de pertes de temps et d'énergie importantes et que les poissons puissent éviter la prédation (Schneider 2009). La **profondeur minimale générale** doit donc être telle que le poisson puisse franchir le tronçon à débit résiduel rapidement et sans dépense d'énergie importante. D'après les faits exposés par Adam et col. (p. 96 et suivantes), la profondeur doit être d'au moins 2,5 fois la hauteur du corps^{1 2}.

Selon les dispositions actuelles, la profondeur minimale générale à appliquer en Suisse est de 20 cm. En général, c'est la valeur effectivement utilisée dans les cours d'eau à truite de rivière. En revanche, des profondeurs plus élevées sont souvent exigées pour la truite de lac (GR: 40 cm, BE > 30-35 cm; annexe A). Certaines truites de rivière peuvent pourtant atteindre la taille des lacustres (dans les affluents du lac de Constance, notamment). À l'inverse, leur taille dépasse rarement 25 cm dans les ruisseaux alpins. La détermination de la profondeur minimale en fonction de l'espèce ou de l'écotype rend donc peu compte des particularités situationnelles. Il semble plus judicieux de se référer à la hauteur du corps des poissons.

Les cours d'eau au régime hydrologique non influencé présentent souvent de courts passages (des raders par exemple) où la profondeur est inférieure à la profondeur minimale générale³. Ces **hauts-fonds**⁴ sont généralement franchis d'un coup par les poissons par une accélération rapide. Cela ne leur est cependant possible que si l'effort demandé n'est pas démesuré, c'est-à-dire si la caudale ne sort pas de l'eau et si le corps ne frotte pas le fond. Pour les salmonidés, la profondeur doit donc être d'au moins 2 fois la hauteur du corps des poissons (Adam et al. 2010, Schneider 2009). Dans la plupart des cantons, probablement, des profondeurs de moins de 20 cm sont tolérées sur de courtes distances (BE, GR, GL, LU, SG, SZ, VD, par exemple). Des profondeurs de 12-15 cm sont cependant généralement jugées inacceptables.

Si, en remontant une rivière, une truite se trouve face à un haut-fond qui ne permet pas à sa caudale d'être totalement immergée et qui exige un contact avec le fond, elle interrompt généralement sa migration et attend que le débit augmente pour poursuivre. Si elle est très motivée, il se peut cependant

La grande question

À quelle profondeur la hauteur d'eau disponible pour le poisson correspond-elle et comment la mesure-t-on ?

Adam et al. (2010, p. 97) définissent la profondeur minimale comme la hauteur d'eau devant absolument être disponible pour le poisson au-dessus des aspérités du fond, c'est-à-dire au-dessus des cailloux. Dans les rivières au substrat très grossier, la profondeur ainsi déterminée serait cependant trop faible. La plus grande profondeur entre les grosses pierres ne correspond toutefois pas non plus à la hauteur d'eau disponible pour le poisson. C'est entre les deux qu'elle se situe.

Si l'on mesure la profondeur au-dessus d'un fond au substrat grossier avec une toise, on aura tendance à mesurer au point le plus bas entre les pierres. L'espace de cours d'eau compris entre les pierres ne peut cependant pas être utilisé par les salmonidés, du moins les plus grands, pour leurs déplacements. La hauteur d'eau disponible pour les poissons est alors surestimée. Pour mesurer une profondeur correcte, il faudrait en fait utiliser une toise montée sur une poutre transversale de l'épaisseur du plus grand poisson présent.

¹ La hauteur à considérer est celle du corps à l'avant de la dorsale. Bien qu'elle soit encore plus élevée à l'état déployé, la hauteur de la caudale n'est pas prise en compte dans la littérature scientifique.

² Pour les salmonidés, Schneider (2009) considère une profondeur minimale de seulement 2 fois la hauteur du corps des poissons.

³ Beaucoup de cours d'eau à truite de lac du canton de Zurich présentent des conditions naturelles d'écoulement telles qu'ils ne sont pas accessibles à partir du lac à l'étiage. La migration ne peut s'amorcer qu'une fois que des pluies suffisantes ont fait remonter le niveau (communication personnelle d'A. Hertig, Fischerei- und Jagdverwaltung ZH).

⁴ D'après Wikipédia, un haut-fond est un relief sous-marin où la profondeur de l'eau est faible par rapport aux points avoisinants ou, plus simplement, une zone d'eau peu profonde.

qu'elle franchisse ce passage en fournissant un effort important et qu'elle se repose ensuite.

Des **situations exceptionnelles** de ce genre peuvent par exemple être causées par des passages à fond lisse. Il s'agit alors généralement d'ouvrages cimentés construits par exemple pour protéger la traversée d'une conduite ou d'un câble, sous un pont ou au niveau d'un gué. Mais il peut également s'agir d'éléments naturels comme des affleurements rocheux. Leur substrat interdit généralement la formation d'un sillon au sein du chenal. L'eau se répartit alors uniformément sur toute la largeur du lit et n'atteint donc que de faibles profondeurs. Les truites sont tout de même en mesure de franchir de tels passages si la profondeur ne les contraint pas à s'aplatir en adoptant une position latérale. De ce point de vue, une profondeur égale à la hauteur du corps serait suffisante⁵. Schwevers et al. (2004) ont montré avec des truites de rivière de différentes tailles qu'une profondeur minimale de 7 cm était requise pour qu'elles puissent remonter un tronçon de rivière.

Dans la plupart des cas, la **hauteur du corps** des plus grands salmonidés présents n'est pas connue. En revanche, la longueur totale a souvent été mesurée ou du moins estimée. Différentes données nous ont été fournies pour le calcul de la relation entre longueur totale et hauteur du corps chez la truite de rivière et la truite de lac (Fig. A2 et A3). Cette relation peut être décrite avec une précision suffisante à l'aide d'une simple régression linéaire. Les droites de régression obtenues pour les deux écotypes sont très proches (Fig. A1). Pour des raisons de facilité, une droite moyenne a été calculée. Elle permet de déterminer la hauteur moyenne du corps à partir de n'importe quelle longueur totale et peut être utilisée aussi bien pour la truite de rivière que pour la truite de lac.

La dispersion des mesures était cependant très importante, chez un écotype comme chez l'autre. Ainsi, la hauteur du corps d'une truite de lac de 60 cm variait de 6 cm et celle d'un individu de 90 cm de 8 cm. La dispersion décrit la variabilité au sein d'une même population. Les différences entre les cours d'eau semblent jouer un rôle secondaire.

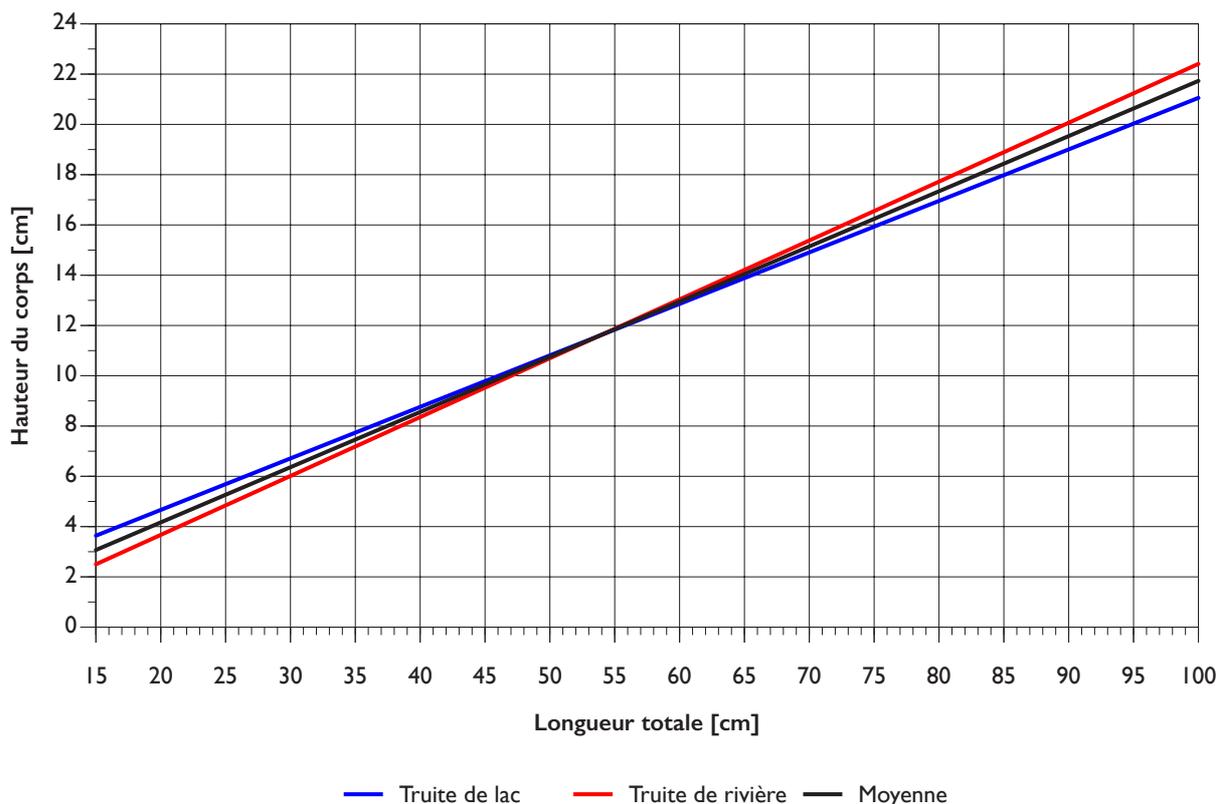
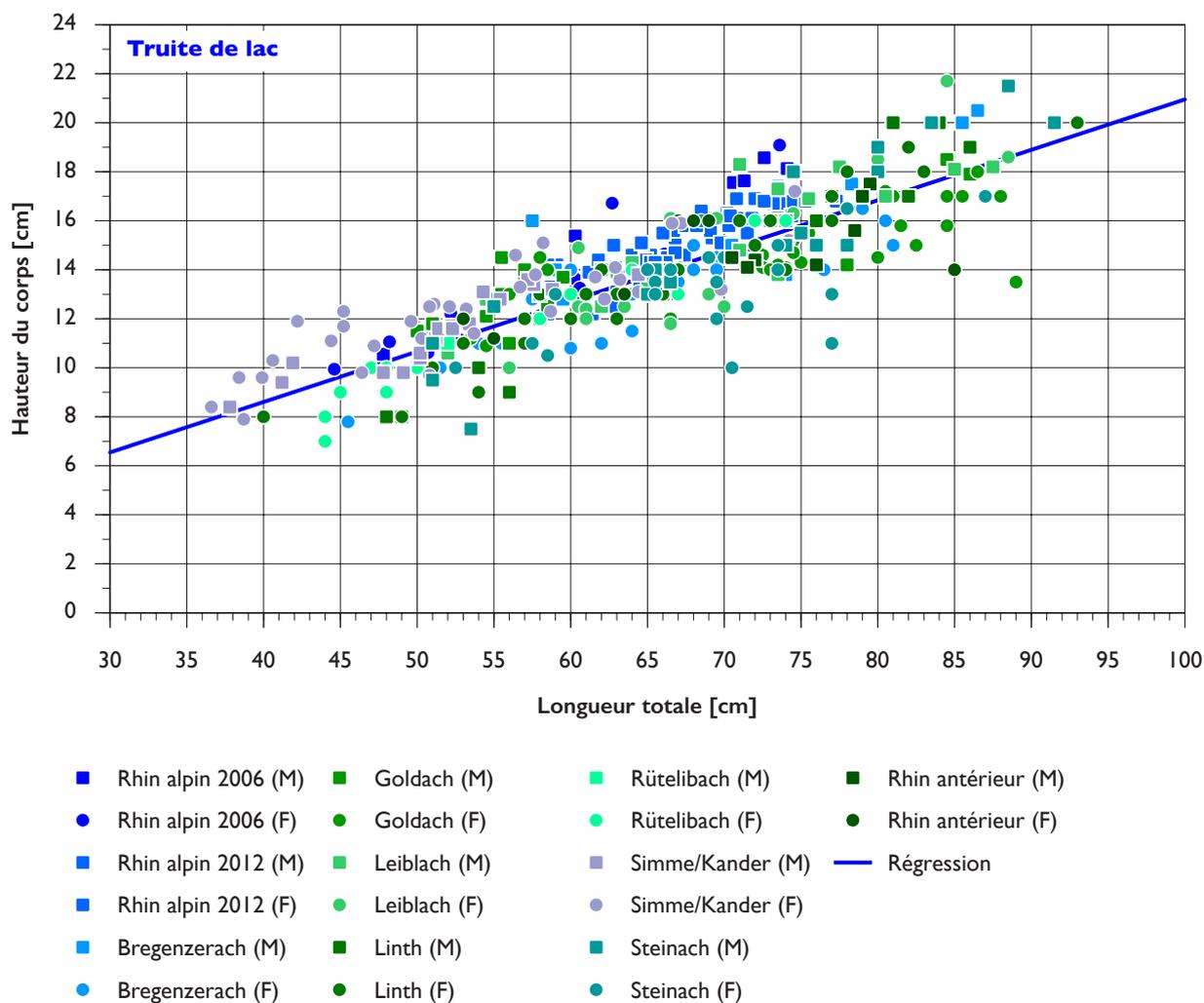


Fig. A1 Relation entre la longueur totale et la hauteur du corps déterminée pour la truite de lac et la truite de rivière et pour une moyenne des deux. Données: cf. Fig. A2 et A3.

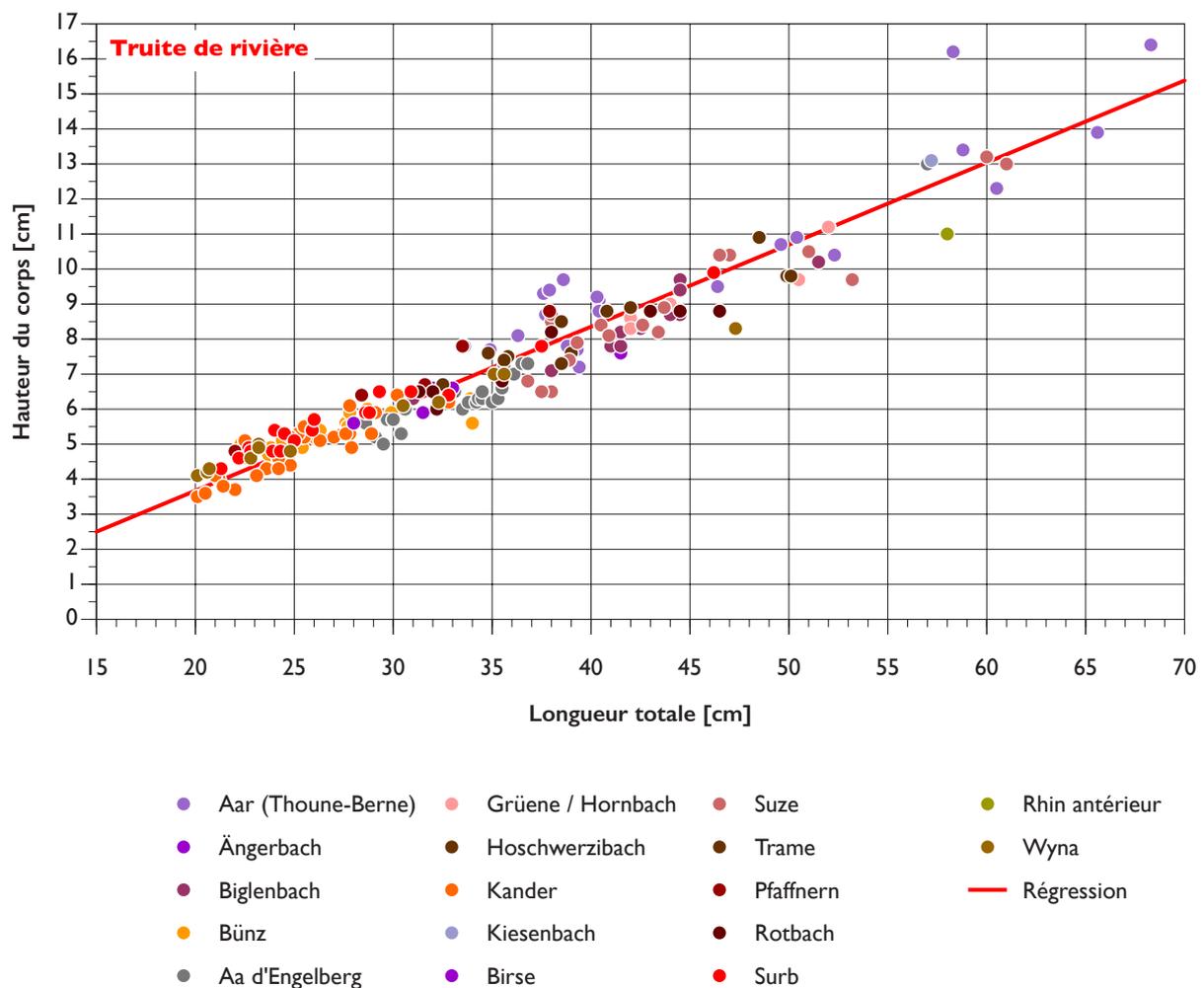
⁵ Dans le Bade-Wurtemberg, la profondeur minimale exigée pour de tels passages est de 1 fois la hauteur du corps, leur longueur ne devant cependant pas excéder 2 m (Dehus 2005).



Cours d'eau	Canton Pays	Longueur totale [cm]	Hauteur du corps [cm]	n	Date de capture	Source des données	Remarques
Rhin alpin 2006 (M)	SG	47,8–74,1	10,6–18,6	8	17.8.-6.9.2006	Mendez 2007	Mesure à partir de photos
Rhin alpin 2006 (F)	SG	44,6–73,6	9,9–19,1	11	17.8.-6.9.2006	Mendez 2007	Mesure à partir de photos
Rhin alpin 2012 (M)	GR	50,8–73,8	11,4–16,7	9	19.-27.11.2012	Canton GR	
Rhin alpin 2012 (F)	GR	58,5–77,3	12,2–17,4	47	3.10.-27.11.2012	Canton GR	
Bregenzerach (M)	A	50,0–86,5	10,0–20,5	12	6.10./17.11.2012	Interreg IV	
Bregenzerach (F)	A	45,5–81,0	7,8–16,5	25	6.10./17.11.2012	Interreg IV	
Goldach (M)	SG	50,0–86,0	11,0–18,5	16	24.10./6.12.2012	Interreg IV	
Goldach (F)	SG	53,5–89,0	10,9–18,0	31	24.10./6.12.2012	Interreg IV	
Leiblach (M)	D	52,0–87,5	10,6–18,3	14	18.10./15.11.2012	Interreg IV	
Leiblach (F)	D	56,0–88,5	10,0–21,7	18	18.10./15.11.2012	Interreg IV	
Linth (M)	GL	48–86	8–20	14	18.10.-7.11.2012	Canton GL	
Linth (F)	GL	40–93	8–20	35	20.10.-14.11.2012	Canton GL	
Rütelibach (M)	GL	52	11	1	20.10.2012	Canton GL	
Rütelibach (F)	GL	44–74	7–16	16	20.10.2012	Canton GL	
Simme/Kander (M)	BE	37,8–64,4	8,4–13,8	19	7.-28.11.2012	Canton BE	
Simme/Kander (F)	BE	36,6–74,6	7,9–17,2	34	7.-28.11.2012	Canton BE	
Steinach (M)	SG	51,0–91,5	7,5–21,5	17	28.11.2012	Interreg IV	
Steinach (F)	SG	52,5–87,0	10,0–17,0	21	28.11.2012	Interreg IV	
Rhin antérieur (M)	GR	70,5–79,5	14,1–17,5	7	25.10.-11.11.2012	Canton GR	
Rhin antérieur (F)	GR	53,0–85,0	11,2–16,0	6	20.10.-4.11.2012	Canton GR	

Fig. A2 Longueurs totales et hauteurs du corps chez la truite lacustre (n=363).

M = mâles, F = femelles Modèle de régression: $y = 0.2049x + 0.5651$ $R^2 = 0.7485$



Cours d'eau	Canton	Longueur totale [cm]	Hauteur du corps [cm]	n	Date de capture	Source des données
Aar (Thoune-Berne)	BE	33,6–68,3	7,2–16,4	25	5.–8.11.2012	Canton BE
Ängerbach	BE	41,5	7,6	1	19.11.2012	Canton BE
Biglenbach	BE	31,0–51,5	6,3–10,2	11	9.11.2012	Canton BE
Bünz	AG	22,3–34,0	4,6–6,3	21	27.9.2012	NAWA
Aa d'Engelberg	NW	28,6–57,0	5,0–13,0	22	5.9.–8.11..2012	Canton NW
Grüene/Hornbach	BE	42–52	8,3–11,2	5	13.11.2012	Canton BE
Hoschwerzibach	BE	39	7,6	1	19.11.2012	Canton BE
Kander	BE	20,1–32,8	3,5–6,4	28	25.10.2012	NAWA
Kiesenbach	BE	57,2	13,1	1	20.11.2012	Canton BE
Birse	BE	28–33	5,6–6,6	4	17.11.2012	Canton BE
Suze	BE	36,8–61,0	6,5–13,2	18	9./22.11.2012	Canton BE
Trame	BE	32,5–50,1	6,7–10,9	11	2.11.2012	Canton BE
Pfaffnern	AG	22,0–37,9	4,8–8,8	5	18.9.2012	NAWA
Rotbach	BE	31,3–46,5	6,0–8,8	8	8.11.2012	Canton BE
Surb	AG	21,3–46,2	4,3–9,9	18	18.9.2012	NAWA
Rhin antérieur	GR	58–71	11–21	2	20.10.2012	Canton GR
Wyna	AG	20,1–47,3	4,1–8,3	12	27.9.2012	NAWA

Fig. A3 Longueurs totales et hauteurs du corps chez la truite de rivière (n=193).

Modèle de régression: $y = 0.2342x - 1.0129$ $R^2 = 0.9112$

B.2 Vitesse de nage

La distance maximale pouvant être parcourue par un poisson sans se reposer dépend de la vitesse à laquelle il nage — mesurée en nombre de longueurs totales par seconde — et de son endurance. Cette vitesse augmente avec la taille du poisson et diminue avec la force du courant. En revanche, elle augmente avec la température de l'eau même si ce réchauffement entraîne une dépense d'énergie supplémentaire. Au-delà du domaine de température optimal, la vitesse de nage se remet à décroître. De manière générale, cette vitesse diminue avec le temps. La baisse est alors d'autant plus forte que le poisson nage vite. Le temps pendant lequel un poisson peut maintenir sa vitesse à un certain niveau est donc un facteur important à prendre en compte.

Dans la littérature scientifique, les auteurs font habituellement la distinction entre les vitesses suivantes (Adam & Lehmann 2011, p. 79 et suivantes)⁶:

- **Vitesse de croisière:** cette vitesse de nage peut être maintenue sans fatigue sur une période prolongée (>200 minutes). C'est à cette vitesse que les poissons migrent sur de grandes distances (pour la reproduction par exemple). Chez les salmonidés, elle atteint au maximum 2 longueurs totales par seconde⁷.
- **Vitesse soutenue:** cette vitesse ne peut être maintenue que sur une période limitée (au maximum 200 minutes) et elle entraîne une fatigue du poisson. C'est à cette vitesse que les poissons franchissent des passages relativement longs présentant des conditions hydrauliques difficiles. Chez les salmonidés, elle est de 4-5 longueurs totales par seconde.
- **Vitesse de pointe, sprint:** Vitesse de pointe, sprint: cette vitesse ne peut être maintenue que brièvement (10-20 secondes). Elle fatigue énormément le poisson, si bien qu'il doit ensuite se reposer pendant plusieurs heures afin de récupérer. Cette vitesse est adoptée en cas de fuite, pour capturer une proie ou pour franchir des passages au courant très rapide. Elle permet également au poisson de franchir de très courts passages de très faible profondeur. Chez les salmonidés, elle est de 10-12 longueurs totales par seconde à température optimale (10-15°C).

La vitesse adoptée dans telle ou telle situation dépend de différents facteurs environnementaux et de la forme physique et du degré de motivation du poisson. La performance natatoire maximale ne peut cependant être atteinte que si la profondeur disponible est suffisante. Si celle-ci s'abaisse trop, la migration doit être interrompue ou, éventuellement, poursuivie à une vitesse plus importante et donc au prix d'un surcroît de fatigue. En regard des faits exposés par Schneider (2009), on peut considérer que les obstacles qui entravent fortement la libre migration sont franchis à vitesse soutenue. Le sprint semble réservé aux situations dans lesquelles la nageoire dorsale risque de sortir de l'eau et le poisson de frotter le fond. En simplifiant, on peut donc retenir la règle suivante concernant le choix de la vitesse de nage en fonction de la profondeur dans les tronçons à débit résiduel (Annexe B.1):

- Vitesse de croisière: cas général, profondeur minimale $\geq 2,5 \times$ la hauteur du corps
- Vitesse soutenue: hauts-fonds, profondeur minimale $2 \times$ la hauteur du corps
- Vitesse de pointe: cas particulier, profondeur minimale $1 \times$ la hauteur du corps

⁶ Ebel (2013, p. 428 et suivantes) livre une bonne revue sur l'efficacité de la nage en se basant sur une étude bibliographique fouillée.

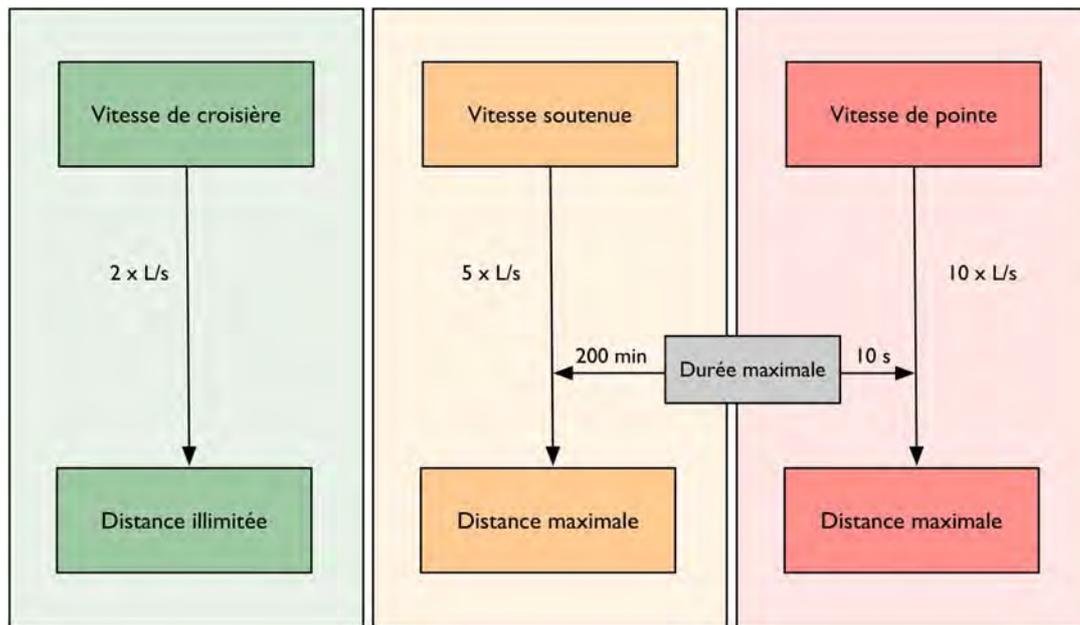
⁷ En plus des valeurs standards relatives aux vitesses de nage indiquées dans le présent document, d'autres valeurs tenant compte de la température sont mentionnées dans Ebel (2013, p. 170 ff) et Katopodis & Gervais (2016).

B.3 Distance maximale

Un autre facteur doit être pris en considération en dehors de la profondeur et de la vitesse de nage: la distance maximale pouvant être parcourue sans phase de repos. En se basant sur la performance nata-toire (Annexe B.2), des distances maximales peuvent être déterminées pour la vitesse soutenue et la vitesse de pointe (Fig. A4).

La vitesse de pointe est adoptée dans les situations particulièrement critiques. La distance pouvant être parcourue en 10-20 secondes ne peut cependant pas être prise comme référence pour évaluer la longueur maximale tolérable de ces passages. En effet, le sprint demande une telle énergie que le temps de repos nécessaire après une telle distance serait démesuré. Par ailleurs, un tel repos demande un habitat adéquat offrant un abri contre les prédateurs (fosses profondes). Il convient donc, objective-ment, de considérer des durées plus courtes pour le sprint.

Dans le canton des Grisons, la durée de sprint considérée pour la truite de rivière est d'à peine 1-2 se-condes (Annexe A), ce qui correspond à une distance de 2-4 m pour un individu de 20 cm de long. De-hus (2005) recommande une distance maximale de 2 m. En général, les passages critiques sont cepen-dant bien plus longs que ces deux mètres. Si l'on considère que la distance à franchir est de 5 m, la vitesse de pointe doit être maintenue pendant 2,5 s (pour une truite de 20 cm). Cette dernière ne pour-rait effectuer plus de quatre de ces sprints sans temps de récupération prolongé.



Longueur totale L [cm]	Vitesse de croisière $I_{max} = \text{illimitée}$ [m]	Vitesse soutenue $I_{max} = 60'000 \times L$ [m]	Vitesse de pointe $I_{max} = 100 \times L$ [m]
20	∞	12 000	20
30	∞	18 000	30
40	∞	24 000	40
50	∞	30 000	50
60	∞	36 000	60
70	∞	42 000	70
80	∞	48 000	80
90	∞	54 000	90
100	∞	60 000	100

Fig. A4 Vitesses de nage des salmonidés et distances maximales franchissables (I_{max}) en fonction de la longueur totale (L). D'après Pavlov 1989, simplifié (Adam & Lehmann 2011).

C Profondeur minimale: recommandations et difficultés

Les considérations de l'annexe B sont grandement théoriques. Elles se basent principalement sur des études de laboratoire et ne rendent pas toujours bien compte de la complexité des contraintes réelles, exogènes ou endogènes, que subissent les poissons. Les recommandations formulées ci-après sont donc volontairement pragmatiques. Les profondeurs minimales calculées en conséquence à partir des données disponibles pour la Suisse (Fig. A2 et A3) sont présentées à la figure A5.

C.1 Cas général

La **profondeur minimale** à maintenir de façon générale dans un chenal continu dans le tronçon à débit résiduel est de 2,5 fois la hauteur des poissons les plus grands. Cette dernière dépend de la longueur totale des plus grands individus (Fig. A1)¹. On considère que si cette profondeur est disponible, les salmonidés sont en mesure de franchir le tronçon influencé à leur vitesse de croisière, Cette vitesse pouvant être maintenue indéfiniment, il n'est pas nécessaire de définir de **longueur maximale** pour le tronçon à débit résiduel.

Pour se calquer sur les pratiques actuelles en Suisse, une profondeur minimale de 20 cm pourrait être exigée en complément de cette règle.

C.2 Hauts-fonds

On entend par « hauts-fonds » des zones de faible longueur situées dans le tronçon à débit résiduel (radiers par exemple) dont la topographie entraîne des profondeurs inférieures à la **profondeur minimale** générale mais non considérées comme particulièrement critiques (chapitre C3). Au niveau des hauts-fonds, la profondeur dans le chenal continu ne doit pas être inférieure à 2 fois la hauteur du corps des plus grands poissons.

En référence aux pratiques actuelles dans certains cantons (GR, NE, VD, etc.), une profondeur minimale de 15 cm pourrait être exigée en complément de cette règle. Étant donné qu'une telle exigence n'a aucune justification biologique connue, nous recommandons d'y renoncer.

On considère que les salmonidés ne peuvent franchir les passages dont la profondeur n'atteint que deux fois la hauteur du corps qu'au prix d'un certain effort. Il est donc nécessaire de définir une **longueur maximale** pour les hauts-fonds. Si l'on applique le modèle des vitesses soutenues, la longueur tolérable pour ces zones de faible profondeur pourrait atteindre plusieurs kilomètres dans certains cas (Fig. A4). Il ne serait alors pas rare que la totalité du tronçon résiduel puisse être qualifié de haut-fond, ce qui serait absurde². Il serait tout aussi faux de se référer à la vitesse de pointe puisque celle-ci n'est adoptée que dans les situations très critiques (Annexe C.3). Il est probable que la vitesse réellement adoptée par les poissons se situe entre ces deux modes³.

La discussion menée avec les experts cantonaux révèle que la longueur tolérée pour les hauts-fonds varie de 5 à 30 m selon les cantons et les situations. Il n'existe cependant pas de bases concrètes pour déterminer la longueur maximale des zones de faible profondeur pouvant être franchies par les salmonidés. Nous recommandons donc une solution pragmatique qui consiste à considérer globalement que la longueur des hauts-fonds ne doit pas dépasser 50 fois la longueur totale des plus grands salmo-

¹ Définition des « plus grands poissons »: voir annexe D.

² En comparaison avec la situation d'un débit naturel, un tronçon à débit résiduel peut être considéré comme un long haut-fond. Dans cette situation, une profondeur minimale d'au moins 2X la hauteur du corps du poisson selon la figure 2 devrait être garantie. Cela impliquerait une énorme restriction d'utilisation de l'exploitant hydroélectrique.

³ Schneider (2009) estime également qu'il convient de considérer des vitesses intermédiaires aux trois grands modes de nage pour certaines zones de rampes en enrochement.

nidés présents. Cette valeur correspond à la moitié de la distance maximale pouvant être parcourue à la vitesse de pointe (Fig. A4). Étant donné, cependant, que les poissons franchissent les hauts-fonds à une vitesse beaucoup plus faible, ils disposent de réserves d'énergie suffisantes, par exemple, pour franchir plusieurs hauts-fonds, avant de devoir interrompre la migration pour se reposer.

C.3 Cas particuliers

Le tronçon à débit résiduel peut présenter des passages où le fond du lit est lisse (suite à un bétonnage ou un affleurement rocheux, par exemple) et où la profondeur est de ce fait particulièrement faible sur de très courtes distances. L'eau s'y répartit en effet sur toute la largeur du lit et la **profondeur minimale** de 2 fois la hauteur du corps ne peut y être atteinte que lorsque le débit est relativement important. Une règle à part doit donc être appliquée: la **longueur maximale** de l'obstacle est fixée à 5 m et la hauteur d'eau minimale à 1 fois la hauteur du corps et 7 cm au minimum.

Ces dispositions générales s'appliquent cependant mal aux tronçons relativement longs où la roche est affleurante et que les poissons franchissent en conditions hydrologiques naturelles. Dans ces cas, la profondeur minimale doit être définie au cas par cas en tenant compte de la situation naturelle et doit être dûment justifiée dans le rapport sur les débits résiduels.

C.4 Profondeur minimale par défaut pour une hauteur du corps inconnue

La profondeur minimale se déduit directement de la hauteur maximale du corps des plus grands poissons (Chap. C.1-C.3). Celle-ci peut être estimée si des données ne sont disponibles que sur la longueur totale (Fig. 3 et A1). Toutefois, la hauteur du corps peut varier de plusieurs centimètres pour une même longueur. De ce fait, la profondeur minimale déterminée à partir de la hauteur du corps calculée diffère plus ou moins fortement de celle qui serait obtenue avec la hauteur mesurée. Le tableau A1 indique la marge d'erreur pour le groupe de données collectées en Suisse.

L'écart par rapport à la profondeur réellement nécessaire est de l'ordre de 0 à 2 cm pour le cas général mais il peut atteindre 6 cm. Il n'existe pas de corrélation avec la hauteur du corps maximale ou avec la longueur totale. L'écart est majoritairement positif, ce qui signifie que la profondeur minimale calculée est en général plus élevée qu'elle ne devrait.

Option

Admissibilité de profondeurs comprises entre 1 et 2 fois la hauteur du corps

Une profondeur inférieure à la profondeur minimale générale peut être admise sur une certaine longueur (définie pour les hauts-fonds). Elle doit alors être d'au moins 2 fois la hauteur du corps.

En principe, des profondeurs inférieures à la valeur définie pour les hauts-fonds pourraient être autorisées sur, par exemple, une longueur maximale de 25 fois la longueur totale des plus grands salmonidés. Cette valeur correspond au quart de la distance maximale pouvant être parcourue à la vitesse de pointe (Fig. A4). La profondeur minimale pourrait alors y être fixée à 1,5 fois la hauteur du corps par exemple.

La grande question

Changements de régime d'écoulement

Dans les larges zones (riffles ou radiers) concernées par des changements de régime de courant (régime sur ou subcritique), la profondeur est souvent très faible et ne peut être augmentée qu'au prix d'une augmentation très importante du débit (ou d'une modification du lit).

Ces zones particulières correspondent en principe à des cas particuliers relevant du chapitre C.3. Les changements de régime de courant sont cependant plus difficiles à définir que, par exemple, un affleurement rocheux ou une rampe lisse. Par ailleurs, la longueur des zones concernées dépasse en général très largement les 5 m autorisés pour les situations exceptionnelles.

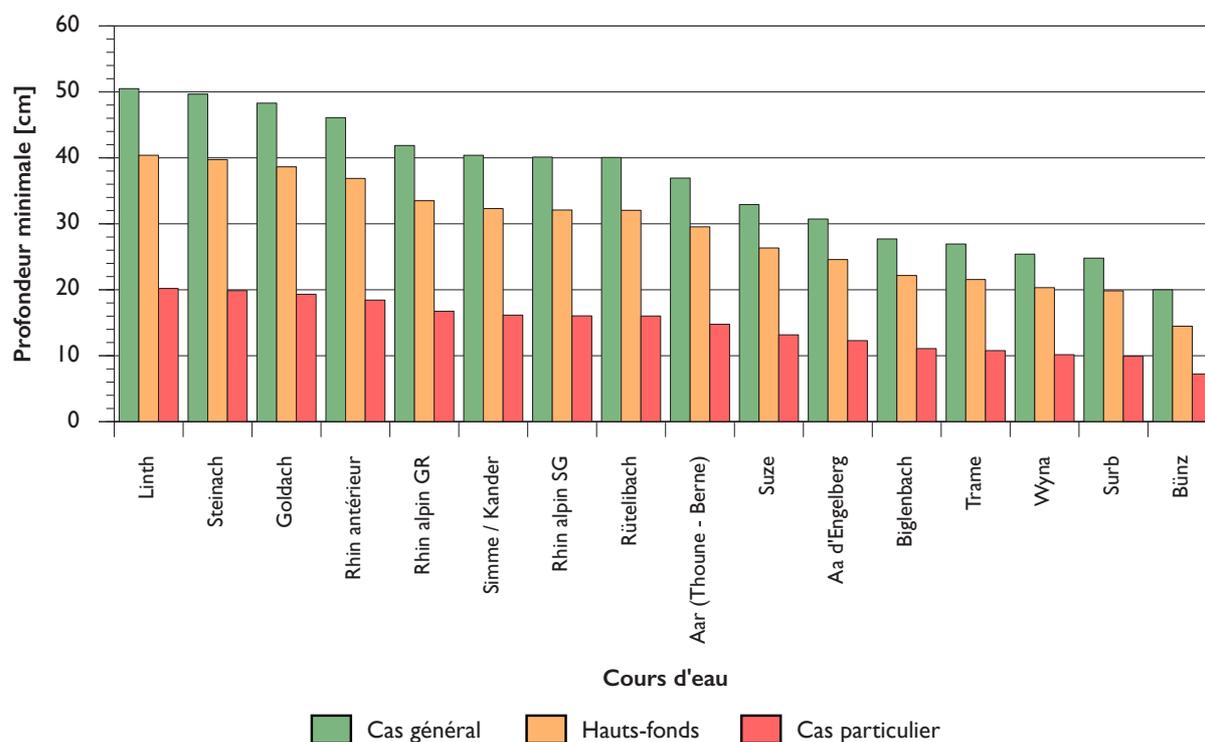


Fig. A5 Profondeurs minimales déterminées pour certains cours d'eau suisses à partir de la hauteur du corps maximale calculée. Jeu de données des Fig. A2 et A3 (seuls cas où $n > 10$ pris en compte). Classement par ordre décroissant de hauteur d'eau.

Tab. A1 Différences entre les profondeurs minimales déterminées à partir des hauteurs du corps maximales calculées et celles obtenues à partir des hauteurs du corps mesurées. Jeu de données des Fig. A2 et A3 (seuls cas où $n > 10$ pris en compte). Classement par ordre décroissant de hauteur du corps maximale.

Cours d'eau	n	Longueur totale max. [cm]	Hauteur du corps max. [cm]			Différence au niveau de la profondeur minimale		
			Mesurée	Calculée	Différence	Cas général	Hauts-fonds	Cas particulier
Linth	49	93,0	20	20,2	0,2	0	0	0
Steinach	38	91,5	21,5	19,9	-1,6	-4	-3	-2
Goldach	47	89,0	18,5	19,3	0,8	2	2	1
Rhin antérieur	13	85,0	17,5	18,4	0,9	2	2	1
Rhin alpin GR	56	77,3	17,4	16,7	-0,7	-2	-1	-1
Simme/Kander	53	74,6	17,2	16,2	-1,0	-3	-2	-1
Rhin alpin SG	19	74,1	19,1	16,0	0,0	0	0	0
Rütelibach	17	74,0	16	16,0	0,0	0	0	0
Aar (Thoune - Berne)	25	68,3	16,4	14,8	-1,6	-4	-3	-2
Suze	18	61,0	13,2	13,2	-0,0	-0	-0	-0
Aa d'Engelberg	22	57,0	13,0	12,3	-0,7	-2	-1	-1
Biglenbach	11	51,5	10,2	11,1	0,9	2	2	1
Trame	11	50,1	10,9	10,8	-0,1	-0	-0	-0
Wyna	12	47,3	8,3	10,2	1,9	5	4	2
Surb	18	46,2	9,9	9,9	0,0	0	0	0
Bünz	21	34,0	6,3	7,2	0,9	2	2	1

C.5 Effets cumulés

On part du principe que les poissons franchissent les tronçons à débit résiduel à la vitesse de croisière lorsque la profondeur est au moins égale à 2,5 fois la hauteur maximale des individus les plus grands. Cette vitesse peut être maintenue quasiment indéfiniment, de sorte que le nombre de tronçons à débit résiduel se succédant au cours de la migration ne devrait pas avoir d'importance notable.

On considère cependant également que les poissons doivent adopter une vitesse entraînant une certaine fatigue lorsque cette profondeur générale n'est pas respectée (hauts-fonds, cas particuliers) ce qui, au pire, demande un repos consécutif de plusieurs heures. Si les poissons doivent franchir plusieurs de ces passages difficiles, la perte d'énergie peut être considérable. S'ils doivent interrompre la migration pour attendre un débit plus élevé, la perte de temps peut à son tour être importante (Chap. 2.2). Ces deux ressources, le temps et l'énergie, manquent ensuite aux poissons pour la reproduction et la dévalaison consécutive.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas possible, aujourd'hui, de quantifier l'effet cumulé de passages successifs de profondeur inférieure à la profondeur minimale générale. Il est donc impossible d'estimer s'il conviendrait d'augmenter la profondeur minimale exigée dans les tronçons à débit résiduel concernés et, si oui, dans quelle mesure.

D Détermination d'une longueur de référence pour la truite de lac

Quelle est la longueur totale à prendre en compte pour le calcul de la profondeur minimale ? S'il n'est pas absolument indispensable de ne considérer que les individus de taille maximale, il peut être envisagé de prendre en compte toutes les longueurs correspondant à un certain quantile.

Dans la pratique, le nombre d'individus de truite de lac capturés lors d'un échantillonnage par pêche électrique ou lors de la pêche du frai est souvent trop faible pour obtenir une indication fiable sur la fréquence des grands poissons. La question se pose donc de savoir s'il convient de définir pour la truite de lac une longueur de référence permettant de déterminer une profondeur minimale pouvant servir de référence pour un bassin versant donné ou pour tous les cours d'eau fréquentés par les truites de lac en général. Cette approche permettrait d'éliminer les incertitudes dues au faible nombre de données locales. Le tableau A2 et les figures A6 et A7 livrent des éléments de décision à ce sujet.

Pour la truite de rivière, il n'apparaît pas opportun de définir une longueur de référence étant donné que la taille maximale pouvant être atteinte varie fortement d'une catégorie de cours d'eau à l'autre.

Tab. A2 Quantiles de la distribution de la longueur totale de la truite de lac (Fig. A7). Jeu de données de la figure A2 complétées de longueurs mesurées dans l'Hasliaare.

Exemple: le quantile 90% de tous les cours d'eau à truite de lac correspond à une longueur totale de 80 cm, ce qui signifie que 90% des poissons de l'échantillon ont une longueur inférieure à 80 cm.

Cours d'eau	n	Quantile [longueur totale en cm]				
		70 %	75 %	80 %	85 %	90 %
Affluents du lac de Constance sans le Rhin alpin	168	74	76	78	81	85
Rhin alpin	80	71	71	72	73	75
Affluents du lac de Constance avec le Rhin alpin	248	73	74	75	78	81
Simme/Kander	56	58	59	62	63	65
Hasliaare	20					
Linth	66	72	73	74	77	81
Tous confondus	390	71	73	74	76	80

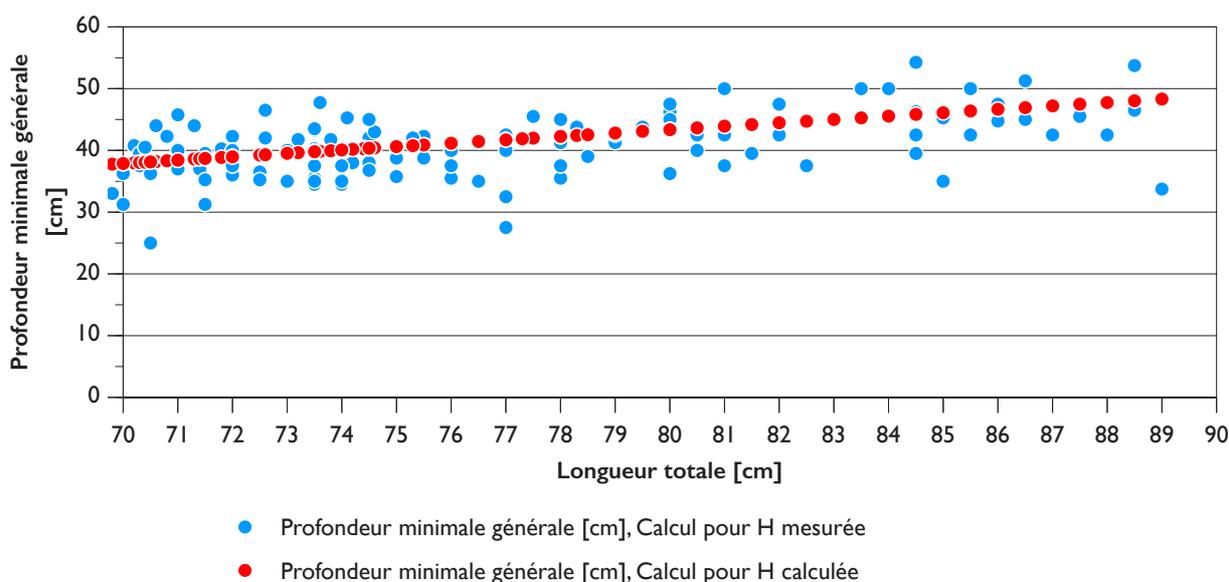


Fig. A6 Profondeurs minimales générales pour les truites de lac de longueur totale comprise entre 70 et 90 cm du jeu de données de la figure A2 (n = 135). Les profondeurs ont été déterminées à partir des hauteurs du corps calculées (en rouge) ou mesurées (en bleu). Pour le premier cas, le jeu de données a été complété de données de l'Hasliaare.

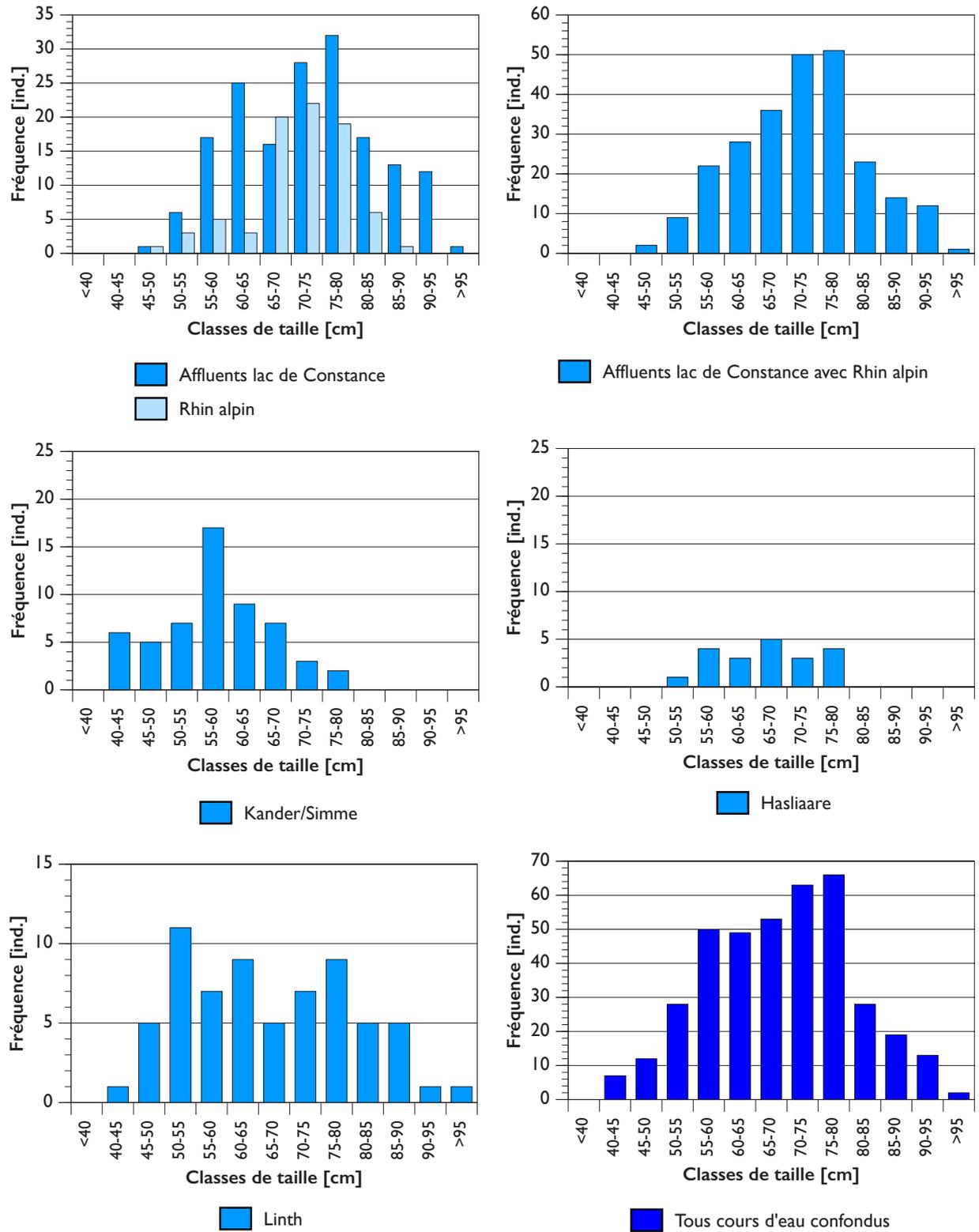


Fig. A7 Distribution des fréquence de longueurs chez la truite de lac. Jeu de données de la figure A2 complé-
té de données de l'Hasliaare.

E Tronçons à débit résiduel abritant des truites de lac

La carte ci-dessous montre les secteurs à débit résiduel en Suisse ainsi que la présence ou la présence potentielle de la truite de lac dans ces secteurs (Dönni et al. 2017). La carte indique si la truite de lac est présente dans un secteur à débit résiduel ou non. En revanche, l'étendue de la colonisation par la truite de lac le long des secteurs à débit résiduel n'apparaît pas (exemple: la truite de lac peu potentiellement colonisé le secteur aval de la Vispa (VS) alors que tous les tronçons à débit résiduel apparaissent en orange).

