

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie  
et d'architecture de Genève



## État des connaissances en matière de suivi des mesures de rétablissement de la dévalaison piscicole



Genève, 12.04.2024

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

## Mentions légales

### Mandant :

Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Eaux, CH-3003 Berne  
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

### Mandataire :

Hepia – Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève  
Route de Presinge 150  
CH-1254 Jussy (GE)

Aquarius  
BP 1767  
CH-2001 Neuchâtel

Scimabio  
Rue de Veyrier 19  
1227 Carouge (GE)

### Auteurs :

#### ***Pilotage et principal contributeur***

Franck Cattaneo, Dr – Hepia  
[franck.cattaneo@hesge.ch](mailto:franck.cattaneo@hesge.ch)  
+41 22 558 56 83

#### ***Accompagnement post-doctorat***

Juliette Becquet, Dr – Hepia  
[juliette.becquet@gmail.com](mailto:juliette.becquet@gmail.com)

#### ***Contributeurs bureaux spécialisés***

Jérôme Plomb – Aquarius  
[jerome.plomb@netaquarius.ch](mailto:jerome.plomb@netaquarius.ch)  
+41 32 724 72 62

Alexandre Richard, Dr – Scimabio  
[alexandre.richard@scimabio.ch](mailto:alexandre.richard@scimabio.ch)  
+41 78 807 37 38

### Suggestion de citation :

Cattaneo F., Becquet J., Plomb J., Richard A., (2024) : État des connaissances en matière de suivi des mesures de rétablissement de la dévalaison piscicole. Mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) : 72 p.

**Accompagnement OFEV :** Simon Gingins

**Remarque :** La présente étude / le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

## Table des matières

1	Cadre et contexte .....	4
2	Objectifs .....	5
3	Organisation .....	6
4	Méthodologie.....	7
4.1	Approche systématique.....	7
4.2	Approche ciblée .....	9
4.3	Consultation d'un groupe d'experts .....	10
4.4	Synthèse des informations collectées .....	11
5	Résultats .....	13
5.1	Description du tableau de synthèse .....	13
5.2	Les dispositifs de dévalaison.....	17
5.3	Méthodes de suivi de la dévalaison piscicole .....	22
5.3.1	Téléométrie (radio ou acoustique).....	24
5.3.2	Dispositif de piégeage (nasse, filet).....	26
5.3.3	PIT-tagging .....	28
5.3.4	Pêche électrique .....	30
5.3.5	Caméra acoustique et échosondeur.....	31
5.3.6	Suivi vidéo ou photographique .....	32
5.3.7	Observation visuelle.....	33
5.3.8	Autre méthode de marquage.....	33
5.4	Bilan des méthodes de suivi de la dévalaison piscicole.....	33
6	Évaluation de la dévalaison .....	38
6.1	Indicateurs .....	38
6.2	Critères d'évaluation de la dévalaison.....	41
6.3	Évaluation des dispositifs de protection, guidage et dévalaison .....	43
7	Recommandations pour l'évaluation des mesures d'assainissement.....	51
7.1	Choix des espèces cibles.....	51
7.2	Effectifs à considérer.....	55
7.3	Classes de taille cibles.....	57
7.4	Origine du matériel biologique.....	58
7.5	Durée du suivi.....	59
7.6	Exemple de protocole d'évaluation de la dévalaison basé sur les méthodes de marquage.....	59
7.7	Vers une élaboration d'un concept de contrôle des effets .....	63
8	Conclusion et perspectives .....	64
9	Références.....	68

# 1 Cadre et contexte

Depuis l'entrée en vigueur, le 1er janvier 2011, de la loi révisée du 11 décembre 2009 sur la protection des eaux (LEaux), les cantons sont chargés de prendre les mesures nécessaires afin d'atténuer les impacts écologiques imputables à la force hydraulique. Parmi ces derniers figurent les entraves à la libre migration des poissons. Au sens de la loi, tout obstacle lié à la force hydraulique et influençant sensiblement la migration des poissons doit être assaini.

Dans ce cadre, le rétablissement de la dévalaison est une obligation légale au même titre que la montaison, et de nombreux ouvrages d'aide à la dévalaison devraient voir le jour sur les centrales hydroélectriques dans un avenir proche. En effet, les délais légaux sont fixés au 31 décembre 2030, date à laquelle les travaux pour les mesures d'assainissement sont censés avoir débuté sur toutes les installations concernées par l'assainissement de la dévalaison. En Suisse, il s'agit d'approximativement 700 installations. Une fois les mesures d'assainissement mises en œuvre, un suivi des effets doit ensuite être effectué. L'OFEV est alors chargé d'évaluer les résultats du suivi des effets et, si ces derniers sont jugés insatisfaisants, de demander des améliorations.

Cependant, dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de définir des objectifs clairs en ce qui concerne l'efficacité attendue d'un dispositif de dévalaison issu d'une mesure d'assainissement. En effet, la dévalaison est un domaine pour lequel des lacunes de connaissances parfois assez importantes existent à l'heure actuelle : non seulement la prise en compte de la thématique de la dévalaison pour l'ensemble de la faune piscicole est récente et jouit de peu de retours d'expérience, mais les suivis de mesures d'assainissement dans ce domaine sont parfois très complexes à mettre en œuvre, du fait par exemple que les poissons peuvent souvent utiliser plusieurs voies de dévalaison. Par conséquent, l'OFEV a sollicité la présente étude afin d'établir un état des lieux des connaissances en matière de suivi des effets des mesures de rétablissement de la dévalaison piscicole dans le but d'établir des critères de diagnostic utilisables dans ses évaluations et prises de positions. Quatre principaux axes de travail ont été étudiés :

- Connaissances actuelles en matière de suivi de la dévalaison piscicole
- Méthodes de suivi utilisées
- Critères d'évaluation de l'efficacité de la dévalaison
- Recommandations pour les suivis d'efficacité des mesures d'assainissement.

À terme, l'objectif pour l'OFEV serait de disposer de protocoles méthodologiques et d'indicateurs standardisés d'évaluation de l'efficacité de mesures de restauration de la migration piscicole, applicables à la diversité des situations rencontrées en Suisse.

## 2 Objectifs

Une première analyse de la littérature scientifique internationale (cf. partie 4) concernant la dévalaison piscicole a rapidement mis en évidence :

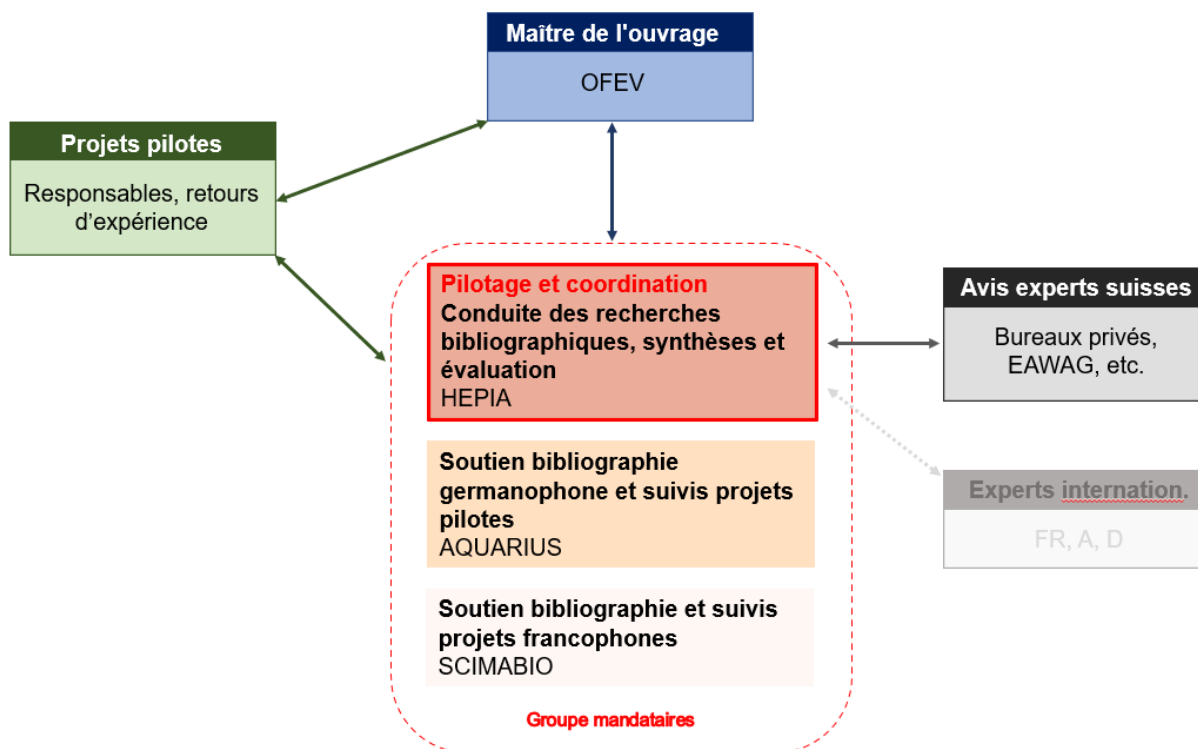
- Un très grand nombre d'études publiées, mais peu de suivis après que des mesures de restauration de la dévalaison ont été prises ;
- Une diversité importante de conditions d'étude (incluant par exemple la taille et le type de cours d'eau, les espèces / communautés piscicoles, les types d'ouvrage et leur fonctionnement, les méthodes et protocoles de suivis biologiques, les indicateurs mesurés, etc...), rendant toute comparaison difficile ;
- Une absence de cadre méthodologique standardisé, potentiellement applicable et transposable à des situations différentes, permettant une évaluation objective de la dévalaison.

À la suite de ce constat, et en concertation avec l'OFEV, les objectifs suivants ont été définis :

- Identifier et compiler les articles scientifiques et rapports d'étude focalisant sur les contrôles d'efficacité de mesures d'assainissement de la dévalaison ;
- Élaborer, sur la base de ces études, un tableau numérique sous format Excel synthétisant les informations les plus pertinentes pour évaluer l'efficacité d'une (de) mesure(s) d'assainissement de la dévalaison, et pouvant être facilement implémenté avec les données de nouveaux projets de suivi ;
- Identifier les informations qui devraient figurer dans les études de contrôle des effets des mesures d'assainissement de la dévalaison dans le but de faciliter leur exploitation ainsi que leur comparaison ;
- Proposer une démarche méthodologique ou un/des protocole(s) d'évaluation de l'efficacité de la dévalaison potentiellement utilisable(s) dans le cadre de nouveaux projets d'assainissement en Suisse ;
- Sur la base des études existantes, discuter des critères à prendre en compte pour définir l'atteinte des objectifs d'assainissement.

### 3 Organisation

L'organisation du mandat est présentée sur la figure suivante (Figure 1).



*Figure 1 : Schéma d'organisation du projet*

Les trois structures partenaires, coordonnées par Hepia, apportent chacune leur expertise et retour d'expériences. La consultation d'experts suisses et étrangers (France, Allemagne, Autriche, Belgique) permet de recueillir leurs avis et d'accéder à des études non préalablement identifiées. Enfin, 4 séances d'avancement et de validation ont été organisées avec notre répondant de l'OFEV.

Le présent rapport constitue une synthèse des résultats qui ont été compilés dans une table Excel (cf. 4.4).

## 4 Méthodologie

La recherche et la compilation d'études **focalisant sur les contrôles d'efficacité de mesures d'assainissement de la dévalaison** (concernant donc des ouvrages récemment équipés de dispositifs de guidage ou de dévalaison) se sont appuyées sur trois approches complémentaires, supposées procurer un balayage relativement complet de l'existant : 1) une recherche systématique dans les bases de données scientifiques, 2) une recherche ciblée sur des plateformes en ligne dédiées à la restauration des cours d'eau, et 3) une consultation d'experts dans le domaine de la migration piscicole. Cette triple approche permet d'accéder à la littérature blanche suisse et internationale, publiée ou non dans des revues scientifiques spécialisées, mais également à la littérature grise notamment grâce aux connaissances des experts consultés. A ces approches principales s'ajoute l'examen des références bibliographiques citées dans des articles déjà identifiés.

Néanmoins, malgré ces trois approches complémentaires, le nombre de cas identifiés répondant aux objectifs fixés reste relativement modeste. Seules 19 études sur 27 sélectionnées évaluent l'efficacité d'un/de dispositif(s) de dévalaison après assainissement (notons que plusieurs études peuvent être relatives au même ouvrage ou à la même mesure d'assainissement). Par conséquent, nous nous sommes autorisés à inclure dans la sélection quelques études évaluant l'efficacité de dispositifs de dévalaison indépendamment de mesures préalables d'assainissement.

### 4.1 Approche systématique

Une recherche bibliographique par approche systématique (Aromataris & Pearson, 2014; Munn et al., 2018; Wright et al., 2007) a permis de répertorier les études existantes et publiées dans des revues internationales sur la dévalaison piscicole au niveau des ouvrages hydroélectriques. Cette recherche a été voulue "large et peu restrictive" de manière à ne pas manquer des articles potentiellement intéressants. Après avoir identifié les principaux termes récurrents dans le champ thématique qui nous concerne, la requête avec les mots clés suivants a été réalisée en utilisant Thomson Reuters Web of Science en décembre 2022, sans limites de date.

fish AND	downstream AND	downstream migra* AND	hydropower AND	monitoring
	OR potamodrom*	OR "downstream move*" <ul style="list-style-type: none"> <li>OR "downstream swim"</li> <li>OR "downstream rout"</li> <li>OR "downstream fish"</li> <li>OR "fishway"</li> <li>OR "fish passag"</li> <li>OR "fish-passag"</li> <li>OR "fish ladder"</li> <li>OR "fish bypass"</li> <li>OR turbin*</li> <li>OR spillway*</li> </ul>	OR "hydropower" <ul style="list-style-type: none"> <li>OR hydroelectric</li> <li>OR dam*</li> <li>OR "water intake"</li> <li>OR intake</li> </ul>	OR success <ul style="list-style-type: none"> <li>OR escapement</li> <li>OR evaluation</li> <li>OR assessment</li> <li>OR mortality</li> <li>OR injur*</li> </ul>

Au total, cette requête a permis d'identifier 533 articles, reflétant ainsi l'abondance des travaux dans ce domaine Néanmoins, un examen détaillé de ces publications afin de ne sélectionner que celles décrivant des suivis après restauration des voies de migration vers l'aval a conduit à retenir seulement 4 articles. Ce chiffre, extrêmement faible, s'explique par le fait que la très grande majorité des travaux ne visent pas à évaluer les effets d'une/de mesure(s) de restauration de la dévalaison appliquée(s) sur un ouvrage, mais :

- Décrivent des patterns généraux de migration (phénologie, fraction migrante, durée, distance...) à l'échelle de tronçons de rivières, incluant un ou plusieurs aménagements ;
- Analysent le rôle des facteurs environnementaux (débit, température, phases de la lune...) sur la migration ;
- Évaluent expérimentalement l'efficacité de systèmes de guidage et/ou de dévalaison, en testant parfois plusieurs variantes, ou la mortalité / les blessures lors du passage par une voie spécifique (turbine, déversoir...) ;
- Établissent un diagnostic de la franchissabilité de l'ouvrage, en quantifiant par exemple les fractions de populations utilisant les différentes voies de passage.
- Analysent le comportement « fin » des individus à l'approche du dispositif de guidage ou de dévalaison.

Si une analyse globale de cette littérature (type méta-analyse), après avoir identifié quelques questions clés, serait sans doute très riche d'enseignements (cf. partie 8), celle-ci dépasse le cadre de cette étude.



## 4.2 Approche ciblée

Parallèlement à l'approche systématique, qui laissait entrevoir une grande diversité des études répertoriées, l'approche ciblée a été conduite en recherchant des études de cas directement sur des plateformes dédiées. D'un point de vue géographique, les études réalisées en Suisse ainsi que dans les pays limitrophes ont été priorisées.

Afin de recenser les rapports d'études suisses sur le suivi de la dévalaison au niveau d'une ou plusieurs centrales hydroélectriques, nous avons utilisé la plateforme en ligne « Plattform renaturierung » (<https://plattform-renaturierung.ch>) qui compile des informations sur l'assainissement de la force hydraulique et les projets mis en œuvre pour la restauration écologique des cours d'eau. Au total, 254 projets y sont recensés, dont 58 concernent des suivis de dévalaison piscicole. Parmi eux, **seulement 6 sont aujourd'hui terminés avec un rapport consultable** : la centrale hydroélectrique de Rüchlig (sur l'Aare ; Breitenstein *et al.* 2020), la centrale de Stoppel (sur la Limmat ; Zaugg & Mendez 2018), la centrale de Lochmühle (sur le Rotbach ; Guthruf & Guthruf-Seiler 2019) et la centrale de Waldhalde (sur la Sihl ; AquaPlus 2017), la prise d'eau du Fossau (Richard *et al.* 2021), et le barrage de la Maigrage (sur la Sarine ; Zurwerra *et al.* 2019). Pour ce dernier cas, notons que l'étude piscicole a été réalisée 12 ans après les travaux d'assainissement, datant de 2005.

L'Allemagne est également très active sur les questions d'assainissement d'ouvrages par rapport à la migration piscicole. De nombreuses études dans ce domaine sont regroupées sur la plateforme <https://forum-fischschutz.de> (mais celle-ci n'est plus mise à jour depuis octobre 2022). Là encore, malgré cette abondante littérature en apparence, peu d'études concernent des suivis post-restauration de la dévalaison. Néanmoins, nous avons pu identifier trois rapports du NINA (Norwegian Institute for Nature Research), l'un portant sur l'anguille argentée (Økland *et al.* 2017) et les deux autres sur les smolts de saumon atlantique (Økland *et al.* 2016 ; Havn *et al.* 2018) au niveau de plusieurs ouvrages hydroélectriques allemands. Quatre autres études ont été sélectionnées, dont deux portent sur le suivi de quatre centrales (Knott *et al.*, 2020, 2023), une est basée sur une approche expérimentale (Cuchet *et al.* 2012), et une relève d'une description de deux sites pilotes sans évaluation de la dévalaison (Pander *et al.* 2013).

De nombreuses études sur la dévalaison (notamment de l'anguille et des smolts de saumon) ont également été réalisées en Norvège et en Suède, sans qu'il s'agisse nécessairement de suivis après assainissement de la force hydraulique. Par exemple, les travaux de O. Calles sont bien représentés dans la littérature. Nous avons intégré deux de

ses études dans cette synthèse (Calles et al., 2013, 2021). Enfin, une étude plus ancienne issue des États-Unis a été prise en compte (Nettles & Gloss, 1987).

### 4.3 Consultation d'un groupe d'experts

Afin d'élargir au maximum le champ de recherche d'informations, notamment pour avoir accès à des études n'ayant pas fait l'objet de publication, un ensemble de personnes très actives sur la problématique de la migration piscicole, et reconnues pour leur expérience dans ce domaine, a été consulté par mail et/ou par visioconférence (cf. ci-dessous) :

- Dr. Aurore Baisez, directrice de l'association Logrami (Loire Grands Migrateurs) qui œuvre pour la gestion et la restauration des populations de poissons migrateurs – Visioconférence ;
- Dr. Hervé Capra, directeur de recherche à INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) - Centre de Lyon-Villeurbanne – Visioconférence ;
- Dr. Eric De Oliveira, ingénieur-chercheur au sein du LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement) de EDF – Visioconférence ;
- Dr. Guntram Ebel, expert en protection de l'environnement (domaine de spécialisation : protection de l'eau), Bureau d'écologie aquatique et de biologie des pêches – E-mail ;
- Dr. Pierre Sagnes, chef du pôle de recherche et développement en écohydraulique OFB (Office Français de la Biodiversité) – E-mail ;
- Dr. Gunther Unfer, chercheur à l'IHG (Institut d'Hydrobiologie et de Gestion des eaux) de Vienne, Autriche – E-mail.

En Autriche, le projet « Fischschutz und Fischabstieg in Österreich » (« Protection des poissons et dévalaison en Autriche ») vise à élargir les connaissances sur la dévalaison de la faune piscicole autochtone au niveau des installations hydroélectriques. Dans le cadre de ce projet, les études de cinq ouvrages (présentées dans trois rapports) ont été intégrées : la centrale de Riedmühle (sur la Thaya ; Unfer & Rauch 2019), les centrales de Laganda et Ebewe (sur la Seeache ; Rauch *et al.* 2019), et les centrales de Kleinarl et Fritzbach (Rauch & Unfer 2019. Ces études, transmises par G. Unfer, sont consultables sur le site gouvernemental suivant : <https://info.bml.gv.at>.

À ce jour, aucune plateforme n'a été créée en France pour rassembler les études de la dévalaison au niveau d'ouvrages hydroélectriques, bien qu'il en existe un certain nombre.

C'est le cas par exemple du projet LIFE4FISH<sup>1</sup>, dont l'un des rapports a été intégré à cette synthèse (Sonny *et al.* 2020), qui vise à mettre en œuvre et valider différents moyens de protection de deux espèces de poissons migrateurs dans la Meuse (l'anguille argentée et le smolt de saumon atlantique) par une exploitation durable des centrales hydroélectriques. Deux autres études françaises ont été intégrées, sur le Gave d'Oloron (centrale d'Auterrive ; Tomanova *et al.* 2015) et la Dordogne (barrage de Tuilières ; Larinier *et al.* 2020). Ces trois études nous ont été conseillées par les membres français du groupe d'experts. Néanmoins, il s'agit de diagnostics de la dévalaison piscicole, et non pas d'évaluations d'efficacité de mesures d'assainissement qui, à la connaissance des experts, n'ont jamais été réalisées en France.

Nous avons également contacté un expert allemand, Dr. G. Ebel, qui n'a pas pu nous donner davantage d'informations que celles déjà identifiées et retenues sur la plate-forme <https://forum-fischschutz.de>.

#### **4.4 Synthèse des informations collectées**

Les différentes études répertoriées (rapports, articles) concernant des suivis post-assainissement de la dévalaison ont été d'abord compilées dans un tableau de synthèse. Ce tableau regroupe l'ensemble des informations nécessaires permettant d'évaluer, selon les situations rencontrées, l'efficacité des mesures mises en place pour assurer la dévalaison piscicole ainsi que les modalités et les résultats du suivi biologique. Les choix effectués quant au logiciel et format utilisés (Excel), à la structure du tableau et aux champs qu'il contient ont été faits en concertation avec notre répondant de l'OFEV. Ce tableau se veut le plus complet possible, tout en étant facilement interrogeable (tri, sélection) et modifiable, et facile à implémenter avec de nouveaux cas.

Dans un deuxième temps, les différents dispositifs de dévalaison, permettant la protection, le guidage ou le transfert des poissons sont rappelés, en se référant aux études précédemment listées ainsi qu'aux exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques publiés par l'OFEV (OFEV, 2022).

Enfin, les différentes méthodes de suivi de la dévalaison piscicole sont présentées, en mettant l'accent sur les indicateurs mesurés et les conditions d'application pour chacune

---

<sup>1</sup> NB : bien que les ouvrages soient situés en Belgique, il s'agit d'un partenariat avec EDF.

de ces méthodes. Un bilan est proposé pour évaluer les avantages / inconvénients de ces méthodes au regard des informations fournies, présenter des protocoles préconisés et discuter de la complémentarité éventuelle de plusieurs méthodes, dans le cadre de l'évaluation de l'efficacité de dispositifs de dévalaison.

Ces différentes parties sont discutées du point de vue de l'efficacité de la dévalaison, en recherchant des critères d'appréciation de la fonctionnalité ou de l'efficacité des dispositifs évalués, et en discutant des résultats des quelques études disponibles se prononçant sur l'atteinte ou non d'objectifs de rétablissement de la dévalaison piscicole. Finalement, des préconisations sont émises dans l'optique de futures études.

## 5 Résultats

### 5.1 Description du tableau de synthèse

Nous appelons « étude » la référence (rapport ou article) dans laquelle sont présentés les résultats d'intérêt. Chaque étude, numérotée, peut faire référence à un seul ouvrage hydroélectrique, ou à plusieurs. Lorsque plusieurs ouvrages font l'objet d'une même étude, et que les résultats sont détaillés pour chaque ouvrage, une lettre (A, B, C...) accompagne le numéro de l'étude. Pour chaque ouvrage étudié, nous parlerons alors de « cas ». Notons que plusieurs études peuvent faire référence au(x) même(s) ouvrage(s), généralement parce qu'il s'agit de la même équipe qui suit l'ouvrage et qui a pu réaliser des expérimentations plusieurs années durant. Ce tableau est structuré autour de 6 catégories d'informations, relatives à :

- La référence de l'étude (titre, année, auteur), et si elle concerne un suivi post-assainissement ;
- La localisation de l'ouvrage et son contexte hydrologique et physiographique : pays, cours d'eau, distance à la source, zonation piscicole... ;
- Les caractéristiques techniques de l'ouvrage : type d'ouvrage, hauteur de chute, puissance... ;
- Les caractéristiques des mesures prises en faveur de la dévalaison piscicole : système de protection, de guidage, dispositifs de dévalaison... ;
- Les caractéristiques du suivi piscicole : méthode(s), effectifs, espèces, principaux résultats ;
- L'évaluation de la franchissabilité.

Un commentaire sur l'étude est parfois ajouté si jugé pertinent. Chacune de ces catégories est renseignée par un certain nombre de champs ( $N_{\text{total}} = 62$ ), décrits ci-après (Table 1).

**Table 1 :** Description de la structure du tableau de synthèse. NB : Certains champs ont été regroupés par rapport au tableau de synthèse (« Méthode », « Espèces observées ») : ils sont ici présentés comme modalités alors qu'ils apparaissent en colonnes séparées dans le tableau de synthèse.

Catégorie	Champs	Format (Unité)	Définition	Modalités (si pertinent)
<b>Référence de l'étude</b>	N	Texte	Référence (numéro, ou numéro + lettre) attribué au cas décrit	
	Titre	Texte	Titre de l'article ou du rapport décrivant le cas	
	Année	Nombre	Année de publication / parution	
	Auteur(s)	Texte	Auteur de l'article ou du rapport décrivant le cas	
	Suivi post-assainissement	Texte	Y a-t-il eu une mesure d'assainissement de la dévalaison ?	Oui / Non
<b>Localisation et Hydrologie</b>	Pays	Texte	Pays dans lequel est situé le cas d'étude	
	Cours d'eau	Texte	Cours d'eau sur lequel est situé le cas d'étude	
	Débit moyen	Nombre (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Débit moyen annuel ou interannuel au niveau de l'ouvrage	
	Largeur	Nombre (m)	Largeur du cours d'eau au niveau de l'ouvrage	
	Distance à la source	Nombre (km)	Distance entre la source et la position de l'ouvrage sur le linéaire du cours d'eau	
	Ordre de Strahler	Nombre	Importance dans le réseau hydrographique selon classification de Strahler (1952)	
	Zonation piscicole	Texte	Zonation piscicole associée au tronçon sur lequel est situé l'ouvrage, selon typologie d'Huet (1954)	Truite, Ombre, Barbeau, Brème
<b>Ouvrage</b>	Nom	Texte	Nom du barrage, de l'usine hydroélectrique ou de la prise d'eau	
	Coordonnées GPS	Nombre (format DMS: degré, minute, seconde)	Latitude et longitude de l'ouvrage en système sexagésimal (WGS84)	
	Type d'ouvrage	Texte	Nature de l'ouvrage et/ou mode d'exploitation	Prise d'eau ; Centrale au fil de l'eau ; Centrale au fil de l'eau avec dérivation ; Centrale fonctionnant par éclusées
	Puissance	Nombre (MW)		
	Débit résiduel	Nombre (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )		
<b>Mesure de protection / guidage / dévalaison</b>	Hauteur de chute	Nombre (m)		
	Type de protection / guidage	Texte	Présence d'un dispositif (mécanique ou comportemental) empêchant l'accès vers le canal d'amenée et les turbines ou orientant le poisson vers un dispositif de dévalaison	Grille horizontale ; grille verticale conventionnelle ; grille verticale inclinée ; grille Coanda ; bar-rack ; louvers ; paroi plongeante ; barrière électrique ; barrière à bulles ; barrage flottant
	Espacement libre des barres	Nombre (mm)	"Vide" entre chaque barre de la grille	
	Inclinaison du plan de grille	Nombre (degré)	Angle $\theta$ d'inclinaison formé par le plan de grille avec le lit (grille verticale inclinée dans le sens du courant; $\theta < 45^\circ$ ), ou angle $\beta$ d'incidence horizontale ( $< 45^\circ$ ) par rapport à la direction de l'écoulement (grille horizontale positionnée en "oblique" par rapport au courant, selon un angle d'incidence $\beta$ )	
	Mesure de dévalaison	Texte	Dispositif de dévalaison équipant l'ouvrage (ou voie de passage permettant de rejoindre le bief aval)	By-pass ; canal / goulotte de dévalaison ; "toboggan" ; passe à poisson ; rivière de contournement ; exutoire de surface ; déversoir ; turbine "fish-friendly" ; surverse par vanne de surface (avec ou sans volets abaissables) ; sousverse
	Débit du by-pass	Nombre (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Débit alimentant l'ouvrage de dévalaison	
	Date de la mesure	Date	Date de la mise en place de la mesure de guidage/dévalaison	

**Table 1 (suite) :**

Catégorie	Champs	Format (Unité)	Définition	Modalités (si pertinent)
Suivi piscicole	Date de début	Date	Date de l'initiation du suivi piscicole	Observation visuelle ; Suivi vidéo/photographique ; Caméra acoustique / échosondeur ; Pit-tagging (RFID) ; Télémétrie radio/acoustique ; Autre méthode de marquage ; Dispositif de piégeage ; Pêche électrique
	Durée	Nombre (mois)	Durée du suivi piscicole	
	Méthode	Texte	Méthode ou technologie mise en œuvre pour effectuer le suivi piscicole	
	Spectre piscicole	Texte	Objectif piscicole (analyse globale - toutes espèces, ou ciblée) associé aux mesures de dévalaison	Espèce-cible ; Communauté
	Nombre d'espèces	Nombre	Nombre d'espèces observées durant le suivi	Anguillidés : <i>Anguilla anguilla</i> (anguille) Cottidés : <i>Cottus gobio</i> (chabot) Cyprinidés : <i>Abramis brama</i> (brême commune) ; <i>Alburnus alburnus</i> (ablette) ; <i>Barbus barbus</i> (barbeau fluvial) ; <i>Chondrostoma nasus</i> (nase, hotu) ; <i>Rutilus rutilus</i> (gardon) Salmonidés : <i>Salmo trutta</i> (truite, incluant les divers écotypes) ; <i>Salmo salar</i> (saumon atlantique) ; <i>Thymallus thymallus</i> (ombre commun)
	Espèces observées	Texte	Principales espèces observées durant le suivi	
	Effectif compté	Nombre	Nombre total d'individus dénombrés par des méthodes de capture (nasse, pêche, filet)	
	Effectif marqué	Nombre	Nombre total d'individus marqués	
	Effectif recapturé	Nombre	Nombre total d'individus recapturés ou redétectés (télémétrie)	
	Effectif de "dévalants"	Nombre	Nombre total d'individus identifiés (par différentes méthodes) comme étant en dévalaison	
	Taux de dévalaison	Nombre	Nombre d'individus identifiés comme étant en dévalaison par heure de suivi	
	Accessibilité	Nombre (%)	Ratio entre le nombre d'individus entrant dans le dispositif de dévalaison par rapport au nombre se présentant à l'entrée du dispositif x 100.	
	Efficacité de passage	Nombre (%)	Ratio entre le nombre d'individus franchissant l'ouvrage par rapport au nombre d'individus identifiés en dévalaison x 100.	
	Temps médian de franchissement	Nombre (min)	Durée médiane nécessaire aux individus entre l'entrée dans le dispositif et la sortie vers l'aval.	
Taux de blessure	Nombre (%)	Proportion d'individus présentant des blessures suite au passage dans le dispositif (ou dans la voie) de dévalaison x 100		
Taux de mortalité	Nombre (%)	Proportion d'individus morts suite au passage dans le dispositif (ou dans la voie) de dévalaison x 100		

**Table 1 (suite) :**

<b>Catégorie</b>	<b>Champs</b>	<b>Format (Unité)</b>	<b>Définition</b>	<b>Modalités (si pertinent)</b>
<b>Evaluation</b>	Franchissabilité pour les espèces "de fond"	Texte	Appréciation qualitative de la possibilité pour la guilde "espèces de fond" de franchir l'ouvrage (ou le dispositif)	Oui ; Non
	Franchissabilité pour les "grandes espèces"	Texte	Appréciation qualitative de la possibilité pour la guilde "grandes espèces" de franchir l'ouvrage (ou le dispositif)	Oui ; Non
	Franchissabilité pour les "petites espèces"	Texte	Appréciation qualitative de la possibilité pour la guilde "petites espèces" de franchir l'ouvrage (ou le dispositif)	Oui ; Non
	Méthode de suivi utilisée (auteurs)	Texte	Appréciation par les auteurs de la méthode de suivi utilisée	
	Mesure de dévalaison (auteurs)	Texte	Appréciation par les auteurs de l'efficacité de la mesure de dévalaison étudiée	
<b>Commentaire</b>		Texte	Particularité à signaler concernant l'étude	



Au total, **27 études ont été compilées** dans le tableau de synthèse (joint à ce rapport sous format Excel), permettant la description de 44 cas. Parmi ces études, 8 ont été réalisées en Suisse (9 cas), 7 en Allemagne (19 cas), 4 en Suède (4 cas), 3 en Autriche (5 cas), 2 en France (2 cas), 1 en Belgique (3 cas), 1 en Norvège (1 cas) et 1 aux États-Unis (1 cas).

Les 44 cas étudiés reflètent une majorité de petits ouvrages, avec pour la moitié d'entre eux, une puissance installée < 0.5 MW, un débit d'équipement < 15 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, et une hauteur de chute < 3 m (Table 2). Ces ouvrages sont très majoritairement des centrales hydroélectriques avec ou sans dérivation, mais un cas rapporte l'étude de la dévalaison au niveau d'une prise d'eau (le Fossau, dans Richard et al. 2021), et un autre cas au niveau d'un barrage non équipé d'une usine hydroélectrique (seuil de Buisdorf, dans Havn et al. 2018).

**Table 2 :** Statistiques descriptives des caractéristiques de l'ouvrage pour les cas intégrés dans le tableau de synthèse. Sont données : le nombre de valeurs renseignées (N), les valeurs minimale (Min.) et maximale (Max.) observées, ainsi que les percentiles 25, 50 (médiane), et 75%.

	Puissance max. (MW)	Débit d'équipement (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Hauteur de chute (m)
<b>N</b>	23	37	29
<b>Min.</b>	0.03	0.5	2.3
<b>P25</b>	0.23	4.5	2.6
<b>P50</b>	0.42	14.5	2.9
<b>P75</b>	1.37	33.0	4.7
<b>Max.</b>	37.00	400.0	46.0

## 5.2 Les dispositifs de dévalaison

En Suisse, assurer la migration du poisson et éviter qu'il ne soit tué ou blessé par des machines au droit des installations hydroélectriques font partie des exigences légales fixées par la loi fédérale sur la pêche (LFSP, art. 9). Selon la directive fédérale sur les bonnes pratiques à mettre en œuvre (OFEV, 2022), les exigences fixées pour la dévalaison piscicole visent plusieurs objectifs :

- permettre aux poissons de passer en aval d'une centrale hydraulique en toute sécurité via un couloir de migration ;

- empêcher les poissons de pénétrer dans les turbines ou d'être blessés durant le passage par le barrage ;
- guider les poissons dans le couloir de migration, qu'ils ne trouveraient que difficilement par eux-mêmes.

L'atteinte de ces objectifs nécessite de prendre en compte le processus de dévalaison dans son ensemble, en décomposant les principales phases de déplacement des poissons vers l'aval comme suit :

- **Protection** : Lors de la phase d'approche de l'obstacle, les caractéristiques de l'ouvrage ou de la mesure d'assainissement doivent être à même de minimiser les risques de blessure, de piégeage ou d'entraînement vers des voies de dévalaison dommageables ;
- **Guidage** : Lors de la phase de guidage, les poissons doivent pouvoir être dirigés aussi efficacement que possible vers une voie de dévalaison ;
- **Transfert** : Lorsque le poisson a été convenablement guidé, il convient qu'il puisse être transféré sans dommage à l'aval de l'obstacle.

Les technologies qui permettent de respecter les exigences fixées en termes de dévalaison sont différentes selon les pays, les cours d'eau ainsi que les installations hydroélectriques concernées. En Suisse, ces technologies sont décrites dans les Exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques publiée par l'OFEV (OFEV, 2022). Elles sont reprises synthétiquement ci-après (Table 3).

**Table 3 : Technologies d'aides à la dévalaison (OFEV, 2022)**

Concept	Type de mesure	Exemples
<b>Protection et guidage</b>	Barrières mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Grille fine (espacement libre des barres <math>\leq 20</math> mm ; grille verticale, horizontale, à câbles, Coanda)</li> </ul>
	Barrières comportementales mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bar racks</li> <li>● Louver</li> <li>● Paroi plongeante</li> <li>● Sillon aménagé sur le fond</li> </ul>
	Barrières comportementales sensorielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Lumière</li> <li>● Son</li> <li>● Flux induit (champs d'écoulement générés)</li> <li>● Champs électriques</li> <li>● Rideau de bulles</li> </ul>
	Barrières comportementales mécaniques et sensorielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Grille fine électrifiée</li> </ul>
	Systèmes collecteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gouttière collectrice proche de la surface</li> <li>● Ascenseur (écluse) à poissons</li> <li>● Dispositifs spécifiques de collecte</li> </ul>
<b>Transfert</b>	Passage du barrage vers l'aval	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Barrage à surverse : faible hauteur de chute, grande profondeur du bassin d'amortissement</li> <li>● Barrage à sous-verse : faible vitesse d'écoulement, diminution lente de la pression</li> </ul>
	Turbines adaptées aux poissons	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Minimum Gap Runner</li> <li>● Turbine Alden</li> <li>● Turbine « low head » (turbine LH)</li> <li>● Turbine « very low head » (turbine VLH)</li> <li>● Vis hydrodynamique</li> </ul>
	Exploitation adaptée aux poissons	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gestion des turbines</li> <li>● Abaissement des vannes</li> <li>● Ouverture des vannes</li> <li>● Ouverture de la vanne de purge</li> </ul>

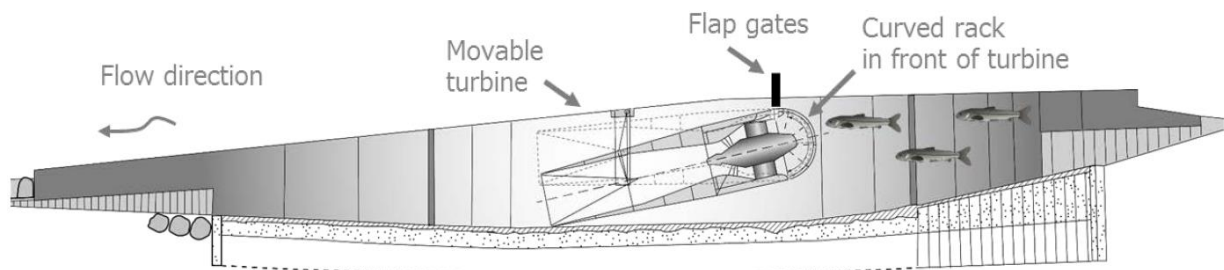
Dans les études prises en compte, les mesures de protection et de guidage ont été autant que possible renseignées, de même que les dispositifs de transfert. Sept mesures de

protection / guidage ont été répertoriées, incluant 5 types de barrières comportementales (paroi plongeante (1 ; Larinier et al. 2020), barrière à bulles (1 ; Sonny et al. 2020), barrière électrique de type Neptun (1 ; Sonny et al. 2020), barrage flottant (1 ; Vikström 2016), et louver (1 ; Rauch & Unfer 2019), une mesure d'exploitation adaptée aux poissons (arrêt des turbines (1 ; Sonny et al. 2020)), et surtout une grande majorité de barrières mécaniques (grille fine). Sur les 32 cas où la grille fine est utilisée, il s'agit dans 13 cas d'une grille verticale (droite ou inclinée), dans 12 cas d'une grille horizontale, dans 2 cas d'une grille incurvée (protégeant une turbine amovible ; Økland et al. 2017), et dans 1 cas d'une grille Coanda (Richard et al. 2021). Les 4 autres cas ne précisent pas l'orientation des barres. Les grilles fines horizontales sont constituées de barreaux espacés entre 15 (5 cas) ou 20 mm (7 cas), et sont orientée d'un angle compris entre 30° et 45° (angle d'incidence horizontal  $\beta$ , cf. OFEV 2022). Les grilles verticales présentent un espacement entre les barreaux compris entre 10 et 30 mm, souvent 20 mm (5 cas correspondant à des ouvrages différents). Au niveau de la centrale de Fritzbach, un louver (écran à persiennes) avec des barreaux espacés de 15 cm complète une grille fine verticale (espacement 20 mm). Il n'y a pas de lien particulier entre la présence d'une grille verticale ou horizontale et la « taille » de l'ouvrage (puissance max., débit d'équipement).

Les dispositifs de dévalaison (ou transfert) rencontrés sont très variés, aussi bien dans leurs types que dans leur conception. On retrouve notamment des by-pass (aussi appelés canaux ou goulottes de dévalaison, en lien avec des exutoires de fond, de surface, ou sur toute la profondeur), des vannes abaissables sur le couronnement du barrage, des vannes de crues ou servant à évacuer la glace (Økland et al. 2017), des échancrures avec bassin de réception à l'aval (Boller 2017), des systèmes de déversoir ou de surverse, des turbines ichtyo-compatibles (type « vis d'Archimède », Knott et al. 2019), des canaux d'évacuation de débris flottants (suite à l'action du dégrilleur), des rivières naturelles de contournement, et différents types de passes à poisson (à fentes verticales, en enrochement...). Quelques exemples de dispositifs sont illustrés en Figure 2, Figure 3 & Figure 4 ci-dessous. Contrairement à la montaison où généralement une seule voie de passage est possible, la plupart des ouvrages répertoriés ici présentent plusieurs voies de dévalaison, allant jusqu'à 7 (usine de Richelien sur la Versoix, Grimardias & Cattaneo 2016) voire 10 (usine de Unkelmühle sur la Sieg, Økland et al. 2017, Havn et al. 2018).



**Figure 2** : Exemples de technologie de transfert des poissons à l'aval d'un barrage. A gauche, Vanne de barrage à sous-verse (centrale hydraulique de Rathausen sur la Reuss, canton de Lucerne). A droite, zone d'entrée d'un by-pass avec une porte busquée (centrale de Rüchlig sur l'Aar, canton d'Argovie). Sources : Dönni W.



**Figure 3** : La turbine à bulbe mobile installée dans le barrage de Gengenbach, dans la Kinzig comme voie de dévalaison. Source : F. Økland et al., 2017.



**Figure 4** : Echanture de dévalaison et bassin de réception à la prise d'eau de la centrale de Waldhalde sur la Sihl. Source : Boller L., 2017.

### 5.3 Méthodes de suivi de la dévalaison piscicole

Il existe diverses méthodes de suivi de la dévalaison qui dépendent en bonne partie des objectifs d'assainissement visés. L'OFEV a, dans ce contexte, publié un guide destiné à aider au choix et à la mise en œuvre de suivi des effets de mesures d'assainissement de la migration piscicole (*Restauration de la migration des poissons – Guide du contrôle d'efficacité des mesures d'assainissement*, 2016). Ce guide dresse un catalogue des méthodes de suivi employées pour effectuer le contrôle de fonctionnalité biologique de la dévalaison, en distinguant différents indicateurs. Il décrit également les avantages et inconvénients des méthodes. Le tableau de synthèse ci-après est tiré du guide susmentionné (Table 4).

**Table 4 : Dévalaison - objectifs d'assainissement et méthodes actuellement disponibles pour évaluer leur degré d'atteinte (Zaugg et al., 2015).**

N°	Objectif d'assainissement	Indicateur	Description / explication	Bassins de comptage	Nasses	Filets	Éléments retenus par les grilles	Vidéo	Infrarouges	Sonars	PIT-Tagging	Télémetrie	Marquage-recapture	
DEV1	Dévalaison par les grilles / les turbines	Fréquence de poissons migrant vers l'aval	Nombre absolu de dévalants			●		●		●				
DEV2	Dévalaison par le dispositif de franchissement			●	●	●		●	●					
DEV3	Dévalaison par le barrage			Étude très rarement possible										
DEV4	Bonne facilité de localisation du dispositif par les poissons	Efficience d'attrait ( $E_{att}$ )	Nombre relatif de dévalants (part des poissons trouvant le dispositif, y entrant et le traversant)							●	●	●	●	
DEV5	Entrée fréquente des poissons dans le dispositif	Efficience d'entrée ( $E_{occ}$ )								●	●	●	●	
DEV6	Bonne facilité de passage	Efficience de passage ( $E_j$ )								●	●	●	●	
DEV7	Faible durée de séjour	Temps nécessaire au franchissement	Pour le franchissement total de l'obstacle								●	●	●	
DEV8	Traversée sans danger des couloirs de migration vers l'aval	Pour tous les couloirs migratoires : • Taux de blessure • Mortalité (différée)	Couloirs migratoires : turbines, dispositif, barrage	●		●	●							
DEV9	Pas de sélectivité par rapport aux espèces	Espèces présentes	Franchissabilité pour toutes les espèces présentes	●		●		●			●		●	
DEV10	Pas de sélectivité par rapport aux guildes écologiques		Franchissabilité pour les poissons de fond	●		●		●			●		●	
DEV11	Pas de sélectivité pénalisant les grands poissons	Distribution des longueurs	Franchissabilité pour les grands poissons	●		●		●	●		●	●	●	
DEV12	Pas de sélectivité pénalisant les petits poissons		Franchissabilité pour les petits poissons	●		●		●						

Les méthodes qui ont été employées dans les études retenues dans le tableau de synthèse se classent en 8 catégories (Table 5) :

**Table 5** : Méthodes de suivi employées dans les études retenues.

Méthode de suivi employée	Nombre de cas concernés
Télémetrie (acoustique ou radio-télémetrie)	22
Dispositif de piégeage (nasse, filet)	18
PIT-tagging	10
Pêche électrique	10
Caméra acoustique et échosondeur (sonar)	5
Suivi vidéo ou photographique	3
Observation visuelle	2
Autre méthode de marquage (que PIT et télémetrie)	2

A noter que plusieurs méthodes ont parfois été employées sur le même ouvrage.

### 5.3.1 Télémetrie (radio ou acoustique)

La **radio-télémetrie** consiste à fixer un radio-émetteur sur le poisson (par exemple, par implantation à travers le muscle dorsal), ou à introduire cet émetteur dans le poisson, soit dans la cavité générale, soit dans l'estomac. Grâce à une batterie et une antenne (enroulée ou non autour de l'émetteur), les radio-émetteurs émettent des signaux à des fréquences individualisées qui peuvent être localisés dans le périmètre d'une antenne de réception mobile ou fixe. En Suisse, les fréquences autorisées se situent dans la gamme 148.00 – 149.00 MHz. Les émetteurs peuvent être détectés sur une distance allant de quelques mètres à 500 m environ si les conditions s'y prêtent. Les données acquises permettent de contrôler le passage en un point fixe, d'évaluer le temps de stabulation dans une zone déterminée, ou de retracer les déplacements des poissons marqués.

La **télémetrie acoustique** consiste à implanter un émetteur d'ultrasons dans la cavité abdominale du poisson. Ce type d'émetteur fonctionne également grâce à une batterie. Les émetteurs génèrent des impulsions acoustiques à des fréquences comprises entre 30 et 300 kHz qui sont captées par des hydrophones. Chaque émetteur génère des signaux selon une suite individualisée d'impulsions qui peut donc être identifiée. La distance d'émission peut aller de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Les données acquises permettent de



contrôler le passage d'individus marqués à un point fixe, ou de retracer les déplacements en combinant les informations enregistrées par plusieurs hydrophones. Selon les objectifs et la configuration du réseau d'hydrophones, il peut être possible d'obtenir les trajectoires en 2D des déplacements des individus marqués, voire dans certains cas, les trajectoires en 3D. Ceci peut s'avérer très intéressant, notamment pour des études précises du comportement des individus marqués à l'approche d'un ouvrage.

Les méthodes télémétriques radio et acoustique sont adaptées pour le suivi à distance et individualisé des poissons permettant des études comportementales au niveau des retenues (retard à la dévalaison, attractivité des dispositifs de franchissement), des voies de passages (couloirs de migration multiples) ou d'obstacles successifs. La télémétrie présente néanmoins des coûts élevés, notamment matériels (émetteurs et récepteurs radio ou acoustiques) mais également humains si des prospections mobiles sont envisagées. Ces coûts sont généralement plus élevés que les autres technologies (Zaugg et al., 2015). Par conséquent, le coût des émetteurs limite généralement le nombre d'individus de l'échantillon. Il peut parfois être opportun de prévoir un étalement du suivi sur plusieurs années, de manière à répartir les coûts tout en ayant *in fine* une bonne taille d'échantillon. Notons également que tous les individus marqués ne seront pas détectés, ou que certains mourront rapidement, et donc ne rentreront pas dans l'analyse des données. Il est donc judicieux de prévoir un effectif d'individus à marquer plus important que la taille d'échantillon souhaitée pour l'analyse des données (par exemple, faire l'hypothèse que 20% à 30% des individus ne seront pas intégrés dans l'analyse des données). Il faut également garder à l'esprit que ce sont des technologies actives, dont les émetteurs nécessitent une alimentation électrique (batterie), et par conséquent qui ont une durée de vie définie. La durée de vie des émetteurs conditionne leur taille (et surtout leur poids) et par conséquent la taille (et le poids) des individus pouvant être marqués. Le choix des émetteurs est donc un compromis entre les espèces et tailles des individus que l'on souhaite marquer, et la durée pendant laquelle on souhaite les suivre. Ceci peut s'avérer limitant, par exemple pour le suivi des petites espèces ou des jeunes stades ontogéniques (nécessité d'utiliser un petit émetteur, mais dont la durée de vie n'est pas nécessairement compatible avec le suivi envisagé).

Parmi les cas intégrés dans le tableau de synthèse ( $n = 22$ ), le nombre de poissons marqués varie de 40 (centrales de Laganda et Ebewe sur la Seeache, Rauch et al. 2020 ; centrale d'Ätrafors sur l'Ätran, Calles et al. 2013) à 603 (centrale des Tuilières sur la Dordogne, France), avec une médiane de 136 individus ( $P_{25} = 96$ ,  $P_{75} = 241$ ). Dans le cas de la Seeache (Rauch et al., 2019), le faible nombre de poissons marqués s'explique par

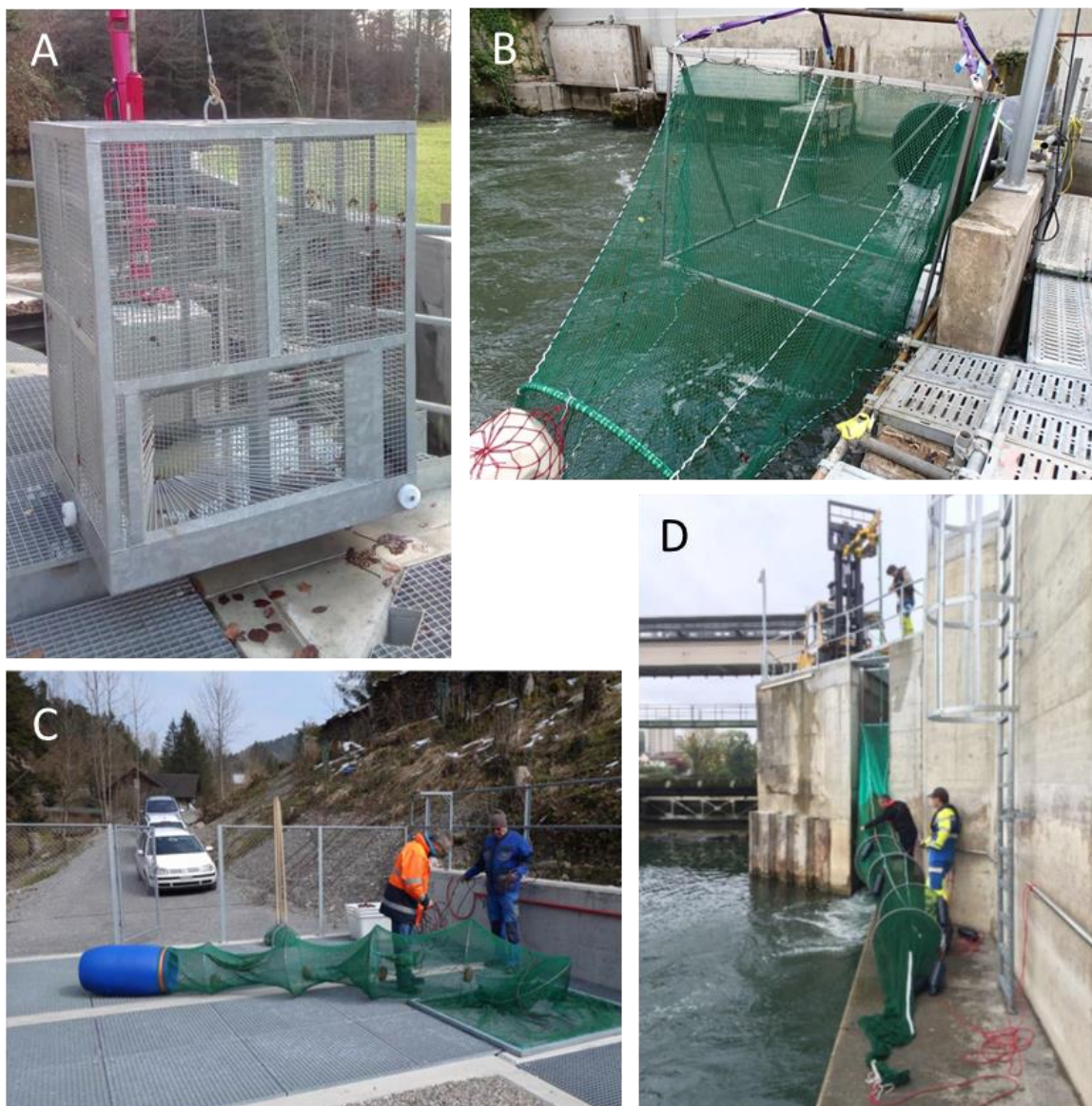
l'utilisation de la télémétrie de façon complémentaire au PIT-tagging (1253 poissons marqués). Dans le cas de la Dordogne (Larinier et al., 2020), le nombre important de marquages s'explique par le fait que le suivi a duré sept ans et est composé de plusieurs campagnes. La télémétrie est parfois utilisée en combinaison avec d'autres méthodes, comme le PIT-tagging (Grimardias & Cattaneo 2016 ; Rauch et al., 2019), l'observation visuelle (Arnekleiv et al., 2007 ; Nettles & Gloss, 1987), les nasses (Heiß, 2015), les sonars et la pêche électrique (Rauch et al., 2019). Dans tous les cas recensés, la télémétrie focalise sur 1 espèce cible (généralement *S. salar*, *S. trutta*, ou *A. anguilla*).

### **5.3.2 Dispositif de piégeage (nasse, filet)**

Nasses et filets sont des systèmes de piégeage passifs très proches dans leurs formes et utilisations (Figure 5), raisons pour laquelle nous les avons regroupés. Les nasses sont des pièges de forme quadrangulaire ou conique présentant une structure rigide, et munis d'une entrée en entonnoir (goulet, ou goléron). Ce goulet doit être conçu de sorte que les poissons puissent entrer dans le piège mais pas en ressortir. Il en existe différentes formes de nasses, pouvant être constituées de différents matériaux (par ex., grillage métallique, tôle perforée, filet). Les filets sont des systèmes de piégeage en matière textile, en forme de sac ou de panier, pouvant ou non être équipés de goulets anti-retour. Nasses et filets sont disposés au niveau des différentes voies de migration possibles, par exemple à l'exutoire d'un by-pass, d'une goulotte de dévalaison, d'une passe à poissons ou des turbines. Leur utilisation requiert une configuration spécifique (par ex., un bassin de comptage équipé pour recevoir la nasse, avec un système de levage ; des profils métalliques en U fixés de part et d'autre de l'exutoire pour y glisser le cadre du filet...).

Les nasses et filets sont utilisés dans 18 cas que nous avons intégrés au tableau de synthèse. Ces dispositifs ont permis la capture de 1 à 42 espèces piscicoles, avec un nombre de poissons piégés variant de quelques-uns (8 à la centrale de Waldhalde sur la Sihl ; Boller, 2017) à plusieurs milliers d'individus (17'094 à la centrale de Röchlig sur l'Aar, Suisse ; Breitenstein et al., 2020). Ces chiffres sont néanmoins très dépendants du site, de la durée et de la période du suivi, et ne sauraient être comparés en tant que tels. De plus la distribution des effectifs capturés par échantillonnage est très asymétrique, avec de nombreuses valeurs nulles ou très faibles, et quelques rares événements présentant des effectifs très grands, correspondant à des pics de dévalaison très ponctuels. Les nasses et filets peuvent « théoriquement » être utilisés comme unique méthode de suivi, mais sont *in fine* assez peu informatifs dans ce cas. Seule une étude n'utilise que cette méthode, dans l'objectif de

quantifier (en %) l'utilisation des différentes voies de passage au niveau de 4 ouvrages (Knott et al. 2023). Plus généralement, ces dispositifs sont utilisés en association avec d'autres méthodes, comme la pêche électrique (Pander et al., 2013 ; Knott et al., 2019), le suivi vidéo et photographique (Maddahi et al., 2022), le marquage (Guthruf, 2019), la télémétrie (Heiß, 2015) ou encore les caméras acoustiques (Breitenstein et al., 2020), ce afin de répondre à d'autres objectifs (par ex., quantifier la fraction dévalante, comparer la structure de la communauté d'individus dévalants avec celle à l'amont de l'ouvrage, analyser le comportement des individus à l'approche du système de guidage...). Ces dispositifs peuvent également être utilisés comme méthode de capture de poissons pour des marquages par PIT-tag ou par émetteurs télémétriques (Rauch et al. 2019).



**Figure 5** : Différents dispositifs de piégeage utilisés dans les études sélectionnées, de type nasse (A : Guthruf 2019, étude n°20), ou filet (B : Aquarius 2018, étude n°2 ; C : Boller 2017, étude n°6 ; D : Breitenstein et al. 2020, étude n°4)

Si le suivi piscicole par nasses ou filets engendre un coût matériel relativement faible, il nécessite des moyens humains importants (Zaugg et al., 2015). Il est en effet nécessaire de contrôler régulièrement le dispositif afin que les poissons ne restent pas trop longtemps piégés (en général, un contrôle journalier). Il faut aussi veiller à l'état de la nasse ou du filet, notamment à ce qu'aucun débris ou feuilles mortes ne viennent obstruer l'entrée, et en réduire l'efficacité, auquel cas il convient de le nettoyer régulièrement. Le « coût » pour les contrôles peut parfois être atténué en sollicitant l'aide des exploitants de l'ouvrage ou des riverains, tel que cela a été fait pour l'étude de la centrale de Lochmüle (Guthruf, 2019). Du fait de ces contraintes, les suivis effectués à l'aide de ces dispositifs sont généralement de durées relativement modestes, quelques semaines ou mois tout au plus. Il faut alors cibler la période préférentielle de migration des espèces cibles, mais au risque de manquer les déplacements d'autres espèces. Par ailleurs, bien que leur utilisation soit flexible et n'influence pas le comportement migratoire, le risque de blessures engendrées sur les poissons peut être élevé, à l'image de l'étude de cas de la Seeache (Rauch et al., 2019) qui montre 40% de mortalité au niveau du piège à poisson. De plus, l'efficacité de capture du dispositif doit être vérifiée au préalable s'il s'agit de l'utiliser comme méthode de comptage : des individus capturés peuvent s'échapper si le goléron n'est pas suffisamment efficace pour fermer la sortie de la nasse, amenant alors à sous-estimer le flux d'individus qui transite. L'efficacité de capture est également dépendante de la taille du poisson, en fonction du vide de maille de la nasse ou du filet : il convient alors d'estimer quelle est la taille minimale des individus pouvant être capturée. Des filets multi-mailles peuvent être utilisés afin d'en réduire la sélectivité et accroître la gamme de taille des individus potentiellement capturables (par ex., Knott et al. 2019). Des recommandations pour l'utilisation de bassins de comptage et de nasses sont fournies dans Wilmsmeier et al. (2019), et sont notamment complétées par une méthode standardisée d'évaluation du potentiel migratoire au moyen de pêches électriques<sup>2</sup>.

### **5.3.3 PIT-tagging**

Les PIT-tags sont des transpondeurs passifs (sans batterie interne), constitués d'une puce, d'un condensateur et d'une antenne encapsulés dans une résine, et fonctionnant sur le principe de la RFID (identification par ondes radio à basse fréquence, en l'occurrence 134.2 kHz). A chaque transpondeur est associé un identifiant unique, qui permettra une

---

<sup>2</sup> Pour plus d'informations, voir <https://plattform-renaturierung.ch/fr/migration-piscicole/aides-de-travail/methodes-standard-wiko-nasses-et-bassins-de-comptage/>

reconnaissance individuelle des poissons marqués. Le PIT-tag est implanté dans la cavité abdominale ou le muscle dorsal des poissons. Lorsque le PIT-tag pénètre dans le champ magnétique produit par une antenne de détection, son condensateur se charge par induction et cette énergie est utilisée pour envoyer l'identifiant au récepteur-enregistreur couplé à l'antenne. Sa durée de vie est par conséquent "illimitée", et il n'y a pas nécessité de recapturer les individus marqués. En revanche, la distance de détection est relativement faible, souvent quelques dizaines de cm (généralement entre 30 et 80 cm), et est corrélée positivement à la taille du PIT-tag. Ceci limite l'utilisation du PIT-tagging à des zones restreintes (fentes verticales des passes à poissons, entrée de goulotte ou canal de dévalaison...) ou à des lames d'eau relativement modestes (surverses, déversoirs, chenal de cours d'eau de faibles largeur et hauteur d'eau). Pour les espèces et tailles d'individus rencontrés dans nos cours d'eau, les PIT-tags de 12 mm et de 23 mm sont les plus couramment utilisés. Sur la truite, par exemple, les PIT-tags de 12 mm peuvent être utilisés dès que les individus atteignent 55 mm, sans risque sur leur survie ou croissance (Richard et al. 2013). Pour des plus gros individus, par exemple des géniteurs de truites lacustres, des brochets ou des silures, on peut utiliser du 32 mm. Notons également que si l'efficacité de la technologie RFID est indépendante de la turbidité de l'eau, elle est en revanche sensible aux perturbations électromagnétiques qui peuvent être particulièrement gênantes dans l'environnement d'un ouvrage hydroélectrique.

Le PIT-tagging est une méthode généralement moins onéreuse que la télémétrie (radio ou acoustique). La différence de coût est surtout liée aux marques : alors qu'un émetteur radio ou acoustique "simple" coûte environ 200 à 250 Fr, un PIT-tag vaut entre 2 et 4 Fr l'unité. En plus d'un marquage très rapide (15 à 20 s par individu) ne nécessitant pas de chirurgie, ce faible coût permet de marquer un grand nombre d'individus (plusieurs centaines voire milliers), quand les études de télémétrie (radio ou acoustique) se limitent souvent à quelques dizaines. Ce coût plus faible des consommables peut néanmoins être partiellement compensé par un coût d'installation parfois supérieur, notamment sur des ouvrages avec plusieurs voies de dévalaison, nécessitant la construction et le positionnement d'antennes complexes. Enfin, si des tracking mobiles sont envisagés afin de rechercher des individus marqués directement dans le cours d'eau à l'aval, le coût humain se voit alors augmenter.

Le PIT-tagging est utilisé dans 10 des 44 cas reportés. Les études utilisant le PIT-tagging focalisent plutôt sur une ou deux espèces-cibles, bien qu'il soit possible de travailler à l'échelle de la communauté (jusqu'à 25 espèces dans Rauch et al. 2019). Peu coûteux et ne nécessitant pas de chirurgie, le PIT-tagging permet de marquer un grand nombre d'individus (si ceux-ci sont disponibles), couramment plusieurs centaines voire milliers. Parmi les cas

intégrés dans le tableau de synthèse, le nombre de poissons marqués varie de 167 (Richard et al., 2021) à 2433 (Grimardias & Cattaneo 2016), avec une médiane de 814 individus (P25 = 314, P75 = 1343). Le PIT-tagging peut être utilisé conjointement à d'autres méthodes de suivi afin d'élargir les objectifs ou de compléter le diagnostic, telles que l'échosondeur (cas de la Maingrauge sur la Sarine, Suisse ; Zurwerra et al., 2019) ou les caméras acoustiques (Rauch et al. 2019), les nasses et filets (cas de la centrale de Riedmühle sur la Thaya, Autriche, Unfer et al., 2019), ou la pêche électrique (cas de la centrale de Fritzbach, Autriche, Rauch & Unfer, 2019). Étonnamment, alors qu'un double marquage par PIT-tag + émetteur radio/acoustique s'avère intéressant pour suivre non seulement le comportement fin des individus au niveau de l'ouvrage (PIT-tagging) mais aussi le processus de migration à une échelle plus large (télémétrie, cf. par ex. Grimardias et al. 2022, non inclus dans le tableau de synthèse), cette approche combinée n'a été utilisée que par deux études dans notre synthèse (Grimardias & Cattaneo 2016 ; Rauch et al. 2019).

#### **5.3.4 Pêche électrique**

La pêche électrique consiste à générer un champ électrique dans l'eau entre une anode (pôle +) et une cathode (pôle -) à l'aide d'un générateur, fixe ou mobile. Le poisson ressent le champ électrique à l'aide de multiples récepteurs localisés tout le long de sa ligne latérale. Si la différence de potentiel ressentie est suffisante, celle-ci va tout d'abord inhiber son activité de nage, puis va agir sur son système nerveux en induisant une excitation de la voie motrice, se traduisant par des contractions musculaires provoquant une nage forcée directionnelle (en direction de l'anode). Le poisson n'est plus maître de ses mouvements et peut aisément être capturé à l'aide d'une épuisette.

La pêche électrique a été utilisée dans 10 cas sur 44 parmi les études sélectionnées, toujours en complément d'autres méthodes, afin de caractériser la communauté piscicole en amont et en aval de l'ouvrage (diversité spécifique, abondances relatives, structure en tailles ; Knott et al. 2019), déterminer les tailles de populations d'espèces cibles, prélever les individus à marquer (PIT-tagging, télémétrie ; Rausch & Unfer 2019), ou retrouver dans le milieu des individus potentiellement marqués par PIT-tagging (Rausch & Unfer 2019).

### **5.3.5 Caméra acoustique et échosondeur**

Les sonars multifaisceaux sont des caméras acoustiques émettant des ondes ultrasons à hautes fréquences, comprises entre 0.7 et 3 MHz (par exemple 1.1 à 1.8 MHz pour la caméra Didson, 1.8 à 3.0 MHz pour l'ARIS, 0.9 à 2.25 MHz pour la Blueview) sous la forme de plusieurs faisceaux étroits et adjacents transmis simultanément. Le réseau de faisceaux capte les échos renvoyés par le fond et les objets en mouvement (poissons) avec des portées comprises entre 5 et 120 m et un angle d'observation compris entre 28 et 140° en fonction des fréquences utilisées, de la résolution et du modèle (Sibley et al., 2023), sachant que les fréquences les plus élevées offrent généralement une meilleure résolution mais un champ d'observation plus restreint. Ces sonars peuvent générer des images vidéo en noir et blanc ou en couleur, l'intensité de la couleur représentant les objets et la force du signal (Martignac et al., 2015) des cibles en temps réel, permettant de déterminer le nombre et la longueur des poissons détectés, la taille des bancs, la direction et la vitesse de déplacement de même qu'une certaine observation du comportement. Du fait de l'emploi d'ondes hautes fréquences, la méthode fonctionne en l'absence de lumière ainsi qu'en milieu turbide comme les estuaires, à la différence des caméras optiques traditionnelles qui nécessitent un éclairage naturel ou artificiel et une visibilité accrue. Néanmoins, l'identification des espèces est rendue difficile avec cette méthode (seulement possible pour les formes les plus caractéristiques) qui ne permet pas non plus une quantification précise du nombre d'individus, et l'angle d'ouverture du faisceau ainsi que la distance d'observation peuvent être dans certains cas limitants (Zaugg et al., 2015). En outre, le coût de la caméra est élevé (>100'000 CHF pour une ARIS) et l'analyse des séquences est encore chronophage, bien que des outils de traitement automatisés tendent à se développer (Fernandez et al., 2023).

De nouvelles générations de sondeurs multifaisceaux arrivent néanmoins sur le marché (Garmin Livescope, Subsea Oculus...) et devraient rendre l'outil plus accessible dans les prochaines années. Les dernières générations de sonars tels que le Garmin Livescope possèdent de très bonnes capacités de détection et un large angle d'ouverture. Parmi les études décrites dans le tableau de synthèse, l'emploi d'un échosondeur Garmin n'a été mentionné que dans l'étude du barrage de la Maigrage (Zurwerra et al., 2019), où des observations ponctuelles ont été réalisées par cet instrument en complément du PIT-tagging, notamment devant la grille et le canal de dévalaison, avec des informations sur la profondeur et les classes de tailles des poissons, sans distinction de l'espèce. Des développements sont en cours en Suisse avec cette technologie afin d'améliorer les possibilités de suivi en continu (méthodes automatisées d'enregistrement et d'analyse des images), et devraient être

prochainement mis à disposition en libre accès. Des tests ont été effectués par Axpo sur l'installation de Stroppel sur la Limmat et sont également en cours sur le Rhône à Lavey<sup>3</sup>. Ces récents développements devraient permettre dans un avenir proche d'étoffer les possibilités d'utilisation du sonar pour des suivis piscicoles.

Les 5 cas d'étude intégrées dans le tableau de synthèse et ayant recours à cette technologie n'utilisent les sonars qu'en complément d'autres méthodes comme les nasses et suivis vidéo et photographiques (Maddahi et al., 2022 ; Zaugg, 2018). Ils permettent notamment d'étudier le comportement des poissons au niveau des dispositifs de protection / guidage.

### **5.3.6 Suivi vidéo ou photographique**

Le suivi vidéo ou photographique se base sur un enregistrement visuel des poissons. Celui-ci peut avoir lieu à travers une vitre (les poissons sont filmés à travers une vitre installée sur l'un des couloirs de migration) ou en interne (une caméra est installée directement dans l'eau). Les avantages principaux de cette méthode sont d'être non-invasive pour les poissons et de permettre une observation comportementale (Zaugg et al., 2015). Néanmoins, selon les caractéristiques de l'ouvrage et le matériel employé, les coûts d'achat et d'installation peuvent être élevés. Le stockage des séquences vidéo enregistrées nécessite un espace volumineux sur un serveur. Ces données devront ensuite être analysées, ce qui peut s'avérer très fastidieux et nécessiter une main d'œuvre importante. Dans certains cas, des algorithmes permettent de réduire le nombre d'enregistrements et donc le temps d'analyse en écartant les périodes sans détections de poissons ; d'autres outils basés sur l'AI (*artificial intelligence*) sont développés de manière à automatiser le traitement des données, mais avec des résultats encore perfectibles sur la détermination spécifique. Enfin, il faut garder à l'esprit que les données peuvent être difficilement exploitables en cas de forte turbidité de l'eau, ce qui peut rendre cette méthode inadaptée à certains types de cours d'eau ou à certaines périodes de l'année (hautes eaux).

Dans les études sélectionnées, le suivi vidéo ou photographique a été utilisé dans 3 cas / 44, dont deux utilisaient cette méthode en complément d'autres technologies, et une utilisait uniquement les vidéos (Cuchet et al., 2012). Cette dernière se basait néanmoins sur une

---

<sup>3</sup> Source : Meister J., 23.05.2023 : Echtzeit-Fischerkennung mit einem kostengünstigen Sonar.12e Journée d'échanges sur l'assainissement de la Migration piscicole – Agenda 21 pour l'eau



approche expérimentale en canal hydraulique afin d'étudier le comportement des individus, et ne peut donc pas être transférée telle quelle en rivière naturelle.

### **5.3.7 Observation visuelle**

L'observation visuelle a été utilisée dans deux études (Arnekleiv et al., 2007; Nettles & Gloss, 1987) en complément de la télémétrie et du PIT-tagging, afin d'apporter des informations complémentaires notamment sur le comportement des poissons.

### **5.3.8 Autre méthode de marquage**

D'autres techniques de marquage que la télémétrie et le PIT-tagging peuvent être employées, mais sont peu utilisées (2 cas / 44 ; Calles et al. 2013, Guthruf 2019). Ces techniques diffèrent notamment en fonction de l'espèce. Dans l'étude de la centrale de Lochmüle sur le Rotbach, en Suisse (Guthruf, 2019), deux types de marquage ont été réalisés en fonction des deux espèces suivies : *Cottus gobio* (marque de couleur) et *Salmo trutta* (coupe de la nageoire adipeuse). Lors d'une opération de recapture, le nombre de poissons ayant traversé l'ouvrage est évalué. Ces méthodes présentent un faible coût en matériaux et des moyens humains modérés (Zaugg et al., 2015). De plus, elles ne nécessitent aucune construction ou installation d'équipement. En revanche, elles occasionnent un stress non négligeable chez les poissons suite aux recaptures et aux manipulations (en particulier en cas d'ablation de nageoire), ne permettent que rarement un suivi individuel des individus marqués (sauf implants visibles numérotés), et ne permettent pas de suivi à distance d'où un fort risque de ne pas recapter les individus après leur dévalaison. Pour ces différentes raisons, le PIT-tagging est aujourd'hui préconisé dans la plupart des cas à la place des implants (colorés, magnétiques ou étiquetés).

## **5.4 Bilan des méthodes de suivi de la dévalaison piscicole**

Parmi les études sélectionnées, 8 méthodes ont été utilisées pour suivre la dévalaison piscicole. Deux d'entre elles sont très majoritairement employées (cf. Table 5 et Figure 6), il s'agit de la télémétrie (n = 22) et des dispositifs de piégeage (n = 18). Néanmoins, alors que la télémétrie est couramment utilisée comme unique méthode de suivi de la dévalaison (dans 14 cas / 22), les dispositifs de piégeage sont quasi systématiquement associés à une autre

méthode de suivi (dans 14 cas / 18). Télémétrie et dispositifs de piégeage sont rarement utilisés conjointement, seulement dans 2 cas. Cela traduit **deux approches différentes de l'estimation du succès de la dévalaison**, mais dont chacune prévaut selon les indicateurs évalués (attractivité, accessibilité, franchissabilité...), la configuration de l'ouvrage (nombre et types de voies de passages) et la population / communauté piscicole étudiée :

- L'application de la **télémétrie** concerne les cas où il n'y a qu'**une seule espèce cible**, et vise principalement à obtenir des **informations relatives**, exprimées par rapport à l'échantillon d'individus marqués, généralement considéré comme représentatif de la population. Les résultats s'expriment sous la forme de **fractions de la population** (% de la population) pour une ou différentes étapes du processus migratoire, permettant *in fine* de déterminer l'efficacité des dispositifs (cf. chap. 5.3.1). Par exemple, la fraction migrante de la population (le % d'individus marqués qui présentent un comportement de dévalaison) peut être estimée, ainsi que la fraction qui se présente à l'entrée du dispositif de franchissement, ou encore celle qui entre dans le dispositif, qui en sort... Dans les cas analysés, ce sont principalement les migrateurs qui sont ciblés (anguille, saumon), ainsi que la truite. Du fait du coût des émetteurs, on privilégie le marquage télémétrique pour des espèces qui présentent **une forte probabilité de migrer**. Potentiellement, on peut utiliser la télémétrie sur plusieurs espèces cibles, mais compte-tenu du coût et de l'effectif nécessaire pour un échantillon robuste, on se limite généralement à 3 voire 4 espèces cibles au maximum.
- L'utilisation de **dispositifs de piégeage** vise surtout à quantifier **un flux net d'individus** qui dévalent. On s'intéresse à **l'ensemble de la communauté** (de 5 à 42 espèces, hormis Guthruf (2019) avec 2 espèces), rarement à une espèce cible (1 cas / 18 : Guthruf 2019). Les dispositifs de piégeage sont intéressants s'ils permettent d'obtenir des **informations complémentaires**, par exemple la proportion d'individus présentant des blessures dues au passage dans une voie de dévalaison spécifique. Si des informations sont disponibles sur la communauté en amont de l'ouvrage (composition spécifique, distribution des tailles des individus...), qui peuvent être obtenues par des méthodes complémentaires comme la pêche électrique<sup>4</sup> (dans 8 cas / 18), on peut alors évaluer la sélectivité des voies de dévalaison par rapport à

---

<sup>4</sup> NB : la pêche électrique ne permet généralement pas d'obtenir une estimation quantitative des tailles de populations au sein de communautés, sauf dans de rares cas.

l'espèce ou à la taille des individus. L'utilisation conjointe avec un sonar (4 cas / 18) permet d'apporter des informations sur le comportement des individus devant un système de guidage, par exemple. Cependant, dans la mesure où on quantifie un flux net et non une proportion des populations de la communauté, on ne sait pas ce que ce flux représente réellement pour chaque espèce. L'effectif dévalant peut être « important » mais ne représenter qu'une faible proportion de la population en amont (celle-ci ne pouvant généralement pas être quantifiée)<sup>5</sup>. De plus, les dispositifs de piégeage n'échantillonnant pas « en continu », il est alors possible de rater des événements importants de dévalaison. Notons néanmoins que Knott et al. (2023) n'utilisent que des dispositifs de piégeage, sans autre méthode complémentaire, ceci dans le but de déterminer l'utilisation relative des différentes voies de dévalaison (le % du nombre d'individus total qui utilise chacune des voies disponibles).

Le **PIT-tagging** a été utilisé dans 10 cas / 44, dont seulement 2 où il représente la seule méthode de suivi. Lorsqu'il est associé à d'autres méthodes, c'est principalement à la télémétrie (4 cas / 10) et/ou à la pêche électrique (3 cas / 10). Limité principalement par la distance de détection (cf. 5.3.3), le PIT-tagging s'avère, comme la télémétrie, très efficace pour **évaluer quantitativement (en %) les différentes efficacités du processus de franchissement** (attractivité, accessibilité, franchissabilité), ainsi que la fraction migrante de la population : les antennes sont ainsi couramment utilisées au niveau du canal d'amenée, dans les goulotte / canaux de dévalaison, sur les déversoirs, éventuellement dans le canal de fuite (aval turbine), au niveau des fentes d'un ouvrage type passe à poissons, dans la mesure où la hauteur d'eau et/ou la section mouillée le permet(tent).

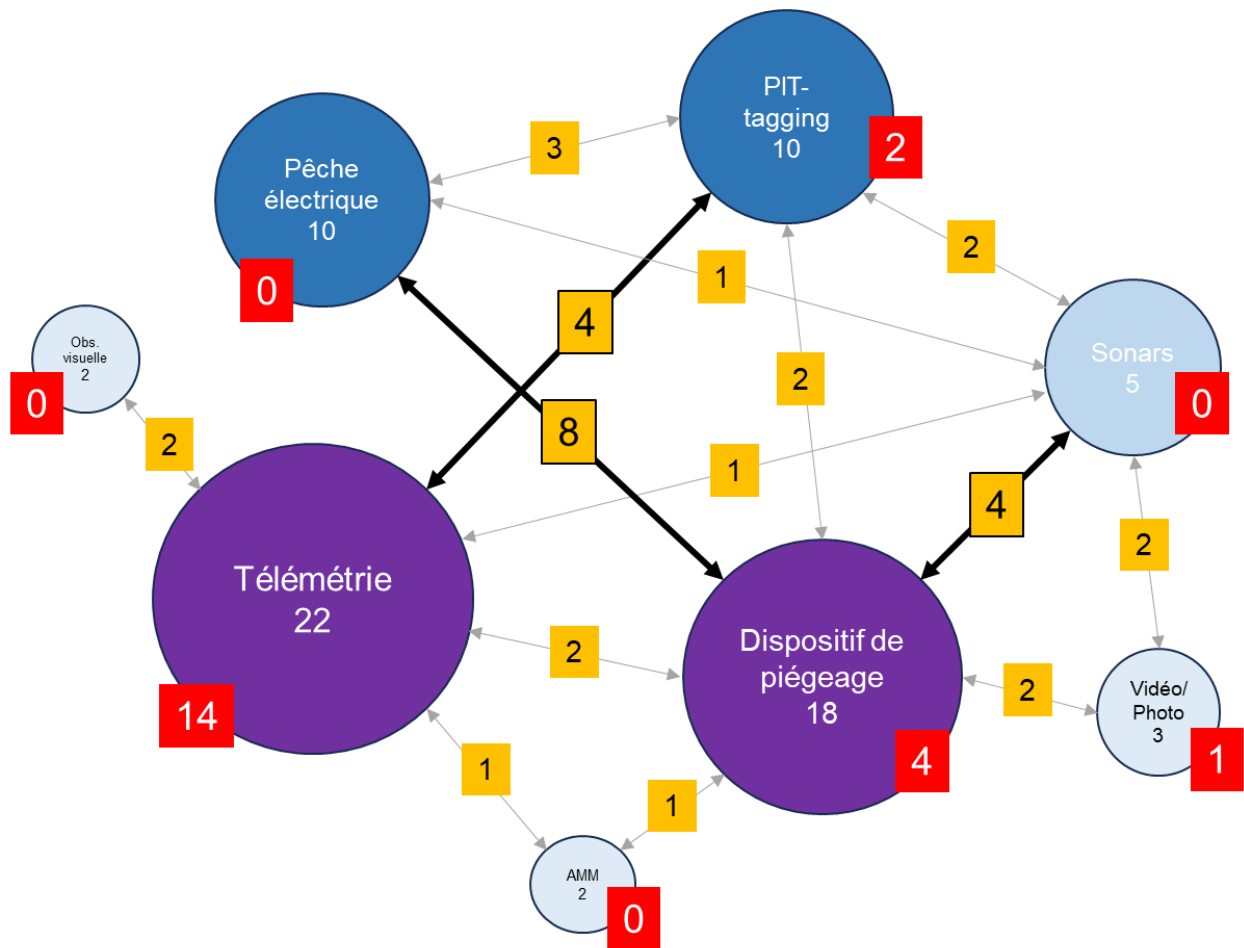
Les caméras vidéo sont utilisées dans 3 cas / 44, incluant 2 cas relatifs à l'usine de Stroppele sur la Limmat (Zaugg & Mendez 2018 ; Maddahi et al. 2022), et une étude expérimentale (Cuchet et al. 2012). A Stroppele, le suivi vidéo est utilisée en complément de dispositifs de piégeage et d'un suivi par caméra acoustique (ARIS), dans l'objectif d'apporter des informations sur les comportements des individus face au dispositif de protection / guidage (grille horizontale). Afin de ne pas modifier le comportement des poissons, notamment dans l'obscurité, une lumière infra-rouge est utilisée.

---

<sup>5</sup> Voir la méthodologie récemment développée concernant l'estimation du potentiel migratoire : Agenda 21 pour l'eau (2022): Méthode standard pour l'évaluation du potentiel migratoire. Fiche technique « De la pratique – pour la pratique » V1.0. Dübendorf ; disponible sur le site : <https://plattform-renaturierung.ch/fr/migration-piscicole/aides-de-travail/methodes-standard-wiko-nasses-et-bassins-de-comptage/>

Toutes les autres méthodes (pêche électrique, sonars, observation visuelle et autres méthodes de marquage) sont systématiquement utilisées pour apporter des informations complémentaires, et non comme méthodes principales d'évaluation de la dévalaison. La pêche électrique est utilisée dans 10 cas / 44, et peut alors avoir différents objectifs : simplement capturer des poissons pour le marquage PIT, être utilisée pour établir un diagnostic des populations / communautés (par exemple, pour effectuer une comparaison amont/aval de l'ouvrage ; Knott et al. 2019), ou encore permettre la localisation de poissons marqués (Rauch & Unfer 2019). Lors d'une comparaison entre la communauté présente juste à l'amont de l'ouvrage, avec celle qui dévale (individus capturés à l'aval de l'ouvrage), la pêche apporte des éléments importants notamment sur les tailles des individus qui migrent, et sur une possible sélectivité de l'ouvrage par rapport à ce paramètre biologique. En revanche, concernant la structure taxonomique du peuplement, il faut être prudent sur les hypothèses que l'ont fait : on ne s'attend pas nécessairement à observer des structures de peuplement identiques entre l'amont et l'aval de l'ouvrage (hypothèse faite dans Knott et al. 2019, par ex.), du fait que la pêche électrique ne permet pas de déterminer les espèces et fractions de populations migrantes en amont de l'ouvrage, et que toutes les espèces et individus au sein d'une population n'ont pas vocation à migrer vers l'aval.

La mise en œuvre de telle ou telle méthode est donc étroitement liée à/aux indicateur(s) évalué(s). Pour cette raison, il est important de savoir précisément les conditions d'emploi de chaque méthode et les objectifs visés en fonction de la configuration de l'ouvrage de manière à proposer ensuite le mode opératoire le plus adapté.



**Figure 6 :** Schéma-bilan des méthodes utilisées pour suivre la dévalaison piscicole dans les études sélectionnées, avec leur fréquence (nombre de cas où elles apparaissent). La taille des cercles est proportionnelle à leur fréquence. Dans les carrés rouges sont indiqués les nombres de cas où la méthode est utilisée seule, sans être associée à une autre. Les flèches grises reliant deux méthodes indiquent qu'elles ont été utilisées en complément, les chiffres dans les carrés jaunes indiquant le nombre de cas où les deux méthodes sont associées. Les flèches noires, en gras, indiquent les principales associations de méthodes. AMM : Autre Méthode de Marquage.

## 6 Évaluation de la dévalaison

### 6.1 Indicateurs

Les indicateurs suivants, représentant des ratios d'individus marqués, sont communément employés dans les études sur la migration piscicole, en particulier sur la dévalaison (CEN, 2021) :

- **La fraction « disponible »** ou **migrante** (= fraction en dynamique de dévalaison, notée  $E_{dev}$ ) correspond au nombre de poissons marqués détectés en amont direct de l'ouvrage ( $N_{disp}$ ) par rapport au nombre total de poissons marqués ;
- **L'attractivité** (ou efficacité d'attractivité, notée  $E_{att}$ ) représente la proportion de poissons détectés dans le voisinage du dispositif de franchissement parmi les poissons disponibles ;
- **L'accessibilité** (ou efficacité d'entrée, notée  $E_{acc}$ ) traduit la proportion de poissons entrant dans le dispositif de franchissement parmi les poissons détectés devant l'entrée de ce dispositif ;
- **La franchissabilité** (ou efficacité de franchissement, notée  $E_f$ ) : cette métrique correspond au ratio entre les poissons qui sortent du dispositif ( $N_{ext}$ ) parmi ceux qui y sont rentrés ( $N_{int}$ ) ;
- **L'efficacité globale** (notée  $E_{tot}$ ) du dispositif de franchissement est la combinaison de l'attractivité, de l'accessibilité et de la franchissabilité de ce dispositif :

$$E_{tot} = E_{att} * E_{acc} * E_f$$

Par simplification, on peut également formuler  $E_{tot}$  de la manière suivante, ce qui est strictement équivalent :

$$E_{tot} = N_{ext} / N_{disp}$$

$E_{tot}$  représente alors le nombre de poissons sortants ( $N_{ext}$ ) du dispositif divisé par le nombre de poissons disponibles (en dynamique de dévalaison,  $N_{disp}$ ).

Outre ces différents ratios, plusieurs autres indicateurs peuvent être utilisés :

- **Le flux d'individus transitant dans l'ouvrage ;**
- **La durée de franchissement de l'obstacle :** temps écoulé entre le moment où un poisson s'approche pour la première fois d'un ouvrage et le moment où il parvient à le franchir par n'importe quel itinéraire (CEN, 2021) ;
- **Le taux de blessure ou de mortalité différée** lors du franchissement d'un couloir de dévalaison ;
- **La sélectivité spécifique ou en fonction de la taille des poissons :** certaines voies de dévalaison offrent des conditions propices pour certaines espèces et certaines classes de tailles seulement, en fonction de leur configuration et de leur fonctionnement hydraulique, mais également en fonction de l'écologie des espèces et des stades étudiés ;
- **Le taux de repli :** pourcentage de poissons qui repartent en amont après avoir franchi un obstacle en dévalaison, soit par le dispositif de franchissement, soit par un autre itinéraire (CEN, 2021). Dans ce cas, les individus sont considérés comme ayant dévalé (donc inclus dans le calcul d'efficacité globale  $E_{tot}$ ). Le demi-tour qui s'ensuit résulte d'une décision comportementale individuelle, mais ne « remet pas en cause » l'efficacité du dispositif de franchissement. Ce demi-tour ne peut être mis en évidence que si un suivi du dispositif de montaison est également effectué.

La Table 6 propose une évaluation de la pertinence des méthodes de suivi pour les différents indicateurs listés dans la Table 3. A titre d'exemple, les pièges et nasses apparaissent adaptés pour des mesures de flux d'individus au travers du dispositif étudié ; en revanche, l'apport de connaissance sur l'attractivité, l'accessibilité et la franchissabilité du dispositif requiert la mise en œuvre de PIT-tagging et / ou de télémétrie.

Parmi les 44 cas d'étude listés dans le tableau de synthèse, l'efficacité globale de passage a été évaluée dans 23 cas (52%), généralement sans distinction de l'attractivité / accessibilité et la franchissabilité du dispositif. Les temps médians de franchissement ont été mesurés dans 17 cas (39%), les taux de mortalité dans 16 cas (36%) et les taux de blessures dans 5 cas (11%).

**Table 6 :** Evaluation de la pertinence des différentes méthodes de suivi pour l'évaluation des différents indicateurs de la fonctionnalité de la dévalaison piscicole : (+) estimation possible uniquement dans certains cas très particuliers (voir par ex. Rausch et al. 2020) ; + méthode adaptée mais information partielle ; ++ méthode adaptée, pouvant présenter des difficultés d'application ; +++ méthode préconisée.

Objectif d'assainissement	Indicateur	Description / explication	Pièges (bassin de comptage / filets / nasses)	Poissons retenus par les grilles	Vidéo-comptage	Caméras acoustiques et échosondeurs	PIT-Tagging	Télémetrie
Dévalaison par les grilles / les turbines	Flux de poissons migrant vers l'aval	Nombre absolu de dévalants	++ (filets)			+	+	+
Dévalaison par le dispositif de franchissement			++		++	+	+	+
Dévalaison par les vannes							+	(+)
Bonne facilité de localisation du dispositif par les poissons	Attractivité	Part des poissons trouvant le dispositif				+	+++	+++
Entrée fréquente des poissons dans le dispositif	Accessibilité	Part des poissons entrant dans le dispositif				++	+++	+++
Bonne facilité de passage	Franchissabilité	Part des poissons traversant le dispositif après être entré				+	+++	+++
Bonne efficacité globale du dispositif (attractivité + accessibilité + franchissabilité)	Efficacité globale	Part des poissons en dévalaison traversant le dispositif				+	+++	+++
Faible durée de séjour	Temps nécessaire au franchissement	Pour le franchissement total de l'obstacle					+++	+++
Traversée sans danger des couloirs de migration vers l'aval	Pour tous les couloirs migratoires : • Taux de blessure • Mortalité (différée)	Couloirs migratoires : turbines, dispositif, barrage	++	+				
Pas de sélectivité par rapport aux espèces	Espèces présentes	Efficacité globale pour toutes les espèces présentes	+++		+++		+	
Pas de sélectivité par rapport aux guildes écologiques		Efficacité globale pour les poissons de fond	+++		+++		+	
Pas de sélectivité pénalisant les grands poissons	Distribution des tailles des poissons	Efficacité globale pour les grands poissons	+++		+++		+++	++
Pas de sélectivité pénalisant les petits poissons		Efficacité globale pour les petits poissons	+++		+++		+++	



## 6.2 Critères d'évaluation de la dévalaison

Afin de pouvoir juger de la qualité des mesures d'assainissement mises en œuvre pour le rétablissement de la dévalaison piscicole au niveau des ouvrages, il est nécessaire sur la base des indicateurs évalués de définir des critères d'évaluation de la dévalaison qui permettent d'estimer si celle-ci est jugée « satisfaisante » ou non, d'un point de vue écologique.

Il n'existe actuellement pas de méthodologie standardisée en Suisse permettant d'évaluer, sur la base de critères objectifs, le succès de la dévalaison pour un ouvrage assaini. Les études consultées n'ont, dans le cadre du présent rapport, pas permis de mettre en évidence de critères précis d'évaluation, ces derniers sont, de manière générale, peu voire pas abordés dans les études sélectionnées. Les appréciations reposent ainsi presque exclusivement sur des avis d'experts et dans la majorité des cas, les limites de classes d'appréciation considérées ne sont pas précisées. Ces constats rejoignent ainsi les observations du « Guide du contrôle d'efficacité des mesures d'assainissement (Zaugg et al., 2016) ». Ainsi, bien que les connaissances aient progressé, des difficultés subsistent et limitent encore actuellement la compréhension et l'appréciation de la problématique de la dévalaison piscicole en général, principalement pour les raisons suivantes :

- Connaissances encore insuffisantes sur les flux, comportements et exigences des espèces pour la dévalaison ;
- Difficultés de suivre l'intégralité des voies de dévalaison, notamment sur les grands cours d'eau ;
- Difficultés d'étudier l'intégralité des communautés piscicoles, notamment sur les grands cours d'eau ;
- Absence de méthode de suivi exhaustive pour certaines voies de dévalaison ;
- Disparité des caractéristiques hydrauliques et techniques importantes entre les installations, rendant la transposabilité des résultats délicate. Plusieurs études ont généralement montré qu'il existait, pour une technologie ou un dispositif donné, de fortes différences d'efficacité selon les sites et les espèces (OFEV, 2022) ;
- Coûts des études parfois très élevés.

De plus, il n'existe pas non plus de référentiel unanimement admis concernant les espèces cibles à prendre en considération lors des suivis, ce qui rend parfois l'interprétation et la comparaison des résultats complexes et délicates. En l'occurrence, s'il est évident que les

espèces migratrices telles que le saumon ou l'anguille doivent impérativement être prises en considération, la quasi-totalité de ces espèces ont disparu de Suisse. Pour le reste, la majorité des espèces présentes dans les cours d'eau suisses sont des espèces potamodromes à migration partielle, présentant des comportements migratoires variables, parfois mal connus, qui peuvent être plus ou moins marqués entre populations d'une même espèce (Heggenes & Traaen, 1988 ; Pavlov & Mikheev, 2017). Au sein d'une même population, la variabilité interindividuelle dans les mouvements / migrations est très grande, et peut dépendre de nombreux facteurs environnementaux, biotiques et abiotiques (Chasserieu et al. 2015 ; Capra et al., 2017). Par exemple, s'il est bien connu que des migrateurs tels que la truite lacustre (*Salmo trutta*, forme lacustre) ont obligatoirement besoin de migrer pour compléter leur cycle de reproduction, d'autres espèces sont davantage sédentaires, comme le chabot *Cottus gobio* (Knaepkens et al., 2004 ; Lelek, 1987). Parmi ces dernières, certaines sont néanmoins capables d'effectuer des migrations sur de longues distances, aussi bien vers l'amont que vers l'aval, à l'image par exemple du barbeau (*Barbus barbus*) ou du nase (*Chondrostoma nasus*) (ATV-DVWK 2004). Dans le tableau de synthèse, 26 cas / 44 ciblent une ou plusieurs espèces pour le suivi de la dévalaison piscicole, et 18 cas s'intéressent à la communauté entière, variant de 5 (Boller 2017, Zurwerra et al. 2019) à 33 espèces (Knott et al. 2019). Le choix de l'espèce ou des espèces cibles est déterminant dans la définition des critères d'évaluation ; un même taux de franchissement sera en effet interprété différemment en fonction de l'écologie de l'espèce, sa propension à migrer et / ou sa nécessité vitale de migrer.

D'autre part, les caractéristiques hydrologiques du cours d'eau, la présence d'obstacles naturels, ainsi que la taille et la configuration des installations hydroélectriques sont autant de facteurs qui doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la dévalaison. De nombreuses études référencées dans le tableau de synthèse insistent notamment sur l'importance du débit (Calles et al., 2021 ; Knott et al., 2023, Sonny et al., 2020), de la turbidité (Breitenstein et al., 2020 ; Knott et al., 2019), et de la température (Arnekleiv et al., 2007 ; Vikstöm, 2016) sur le succès de dévalaison des poissons. Cuchet et al. (2012) et Breitenstein et al. (2019) montrent aussi une forte influence du moment de la journée ou des phases de la lune sur le comportement de migration.

Il se pose également la question des ouvrages successifs : doit-on avoir la même exigence lorsque plusieurs barrages se succèdent ? En effet, l'impact global de plusieurs centrales sur une même rivière peut potentiellement dépasser le simple cumul des impacts de chaque centrale, puisqu'un poisson déjà blessé peut avoir une tolérance réduite à de

nouvelles blessures, ainsi qu'une susceptibilité accrue aux maladies et à la prédation (Økland et al., 2017). En outre, les temps de résidence dans chaque ouvrage peuvent induire des effets retard à la migration et des mortalités indirectes lors de la recherche d'exutoires. L'appréciation de la dévalaison dans le cas de plusieurs ouvrages rapprochés devrait donc considérer le cours d'eau et son peuplement piscicole dans son ensemble et coordonner autant que possible les actions de suivi. Par exemple, sur la Meuse, où de nombreux barrages successifs fragmentent le cours d'eau, EDF (Electricité de France) vise une efficacité de franchissement par ouvrage de 95 % à la dévalaison pour les migrateurs amphihalins (smolts de saumon et anguilles ; E. de Oliveira, ingénieur de recherche, EDF - LNHE Chatou - France, communication personnelle).

La définition de critères d'évaluation de la dévalaison nécessite donc d'améliorer les connaissances sur le comportement migratoire des espèces piscicoles rencontrées dans les cours d'eau suisses, et de pousser plus loin la réflexion sur les choix qui s'offrent aux décisionnaires en fonction de chaque contexte. Pour cela, il pourrait être intéressant de réaliser une synthèse bibliographique plus large par typologie de cours d'eau (des cours d'eau à truites équipés de petits ouvrages aux grands cours d'eau abritant une faune piscicole diversifiée > 15 espèces), telle qu'initiée en partie 8. Parallèlement il est nécessaire d'alimenter le tableau de synthèse à partir de cas d'études de suivis de mesures d'assainissement de la dévalaison (combinant idéalement une évaluation pré- et post-assainissement), afin qu'au fur et à mesure de ces retours d'expérience, le diagnostic puisse être affiné en procédant par analogie avec des études similaires.

### **6.3 Évaluation des dispositifs de protection, guidage et dévalaison**

Ne disposant pas de méthode critériée permettant d'évaluer quantitativement l'efficacité des dispositifs de protection, guidage et dévalaison, il a été choisi pour chaque étude intégrée dans le tableau de synthèse, de classer l'évaluation de ces dispositifs selon trois modalités discrètes : bon, moyen, mauvais. Ce classement résulte d'une appréciation subjective de notre part, suite aux interprétations et discussions rédigées dans les études par leurs auteurs. Il s'agit donc d'une évaluation relativement « grossière », qui n'informe pas précisément sur les avantages et inconvénients de chaque dispositif, mais qui permet néanmoins une lecture simplifiée du tableau de synthèse. Parmi les 44 cas d'études répertoriés, cette évaluation a été rendue possible dans 37 cas (15 évaluations « bonnes », 12 « moyennes » et 10 « mauvaises »), dont 21 cas ont également fourni des efficacités de passage. La table 6 répertorie 18 cas d'étude parmi ces 21 qui ont spécifiquement évalué la

dévalaison (3 études se sont focalisées sur l'efficacité de mesures de protection / guidage et ont été retirées). A titre d'exemple, dans l'étude de Zurwerra et al. (2019) sur la Maigrauge, le dispositif de dévalaison est jugé « mauvais » car seuls 14.2 % des individus se présentant à l'entrée pénètrent effectivement dans le canal de dévalaison et sont transférés. Sur la Versoix, le dispositif de l'usine de Richelien est jugé « mauvais » car 41 % des smolts dévalants de truite lacustre passent à travers la grille verticale de protection des turbines, et 98 % en meurent. Sur la Limmat à Stroppel, Maddahi et al. (2022) estiment que l'efficacité du système de dévalaison est « bonne », car 84 % des individus arrivant devant la grille horizontale pénètrent dans le by-pass.

Si l'on compare les études ayant conclu à une bonne efficacité du dispositif de dévalaison (n = 15) avec celles concluant à une mauvaise efficacité (n = 10), il n'est pas évident de faire ressortir un ou plusieurs facteurs discriminants. La « taille de l'ouvrage » (exprimée par la puissance installée ou le débit d'équipement) ne semble pas être un critère déterminant, même si nous pouvons noter que les plus gros ouvrages (par ex., > 100 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> de débit d'équipement) sont associés à une bonne efficacité de dévalaison (par ex., Breitenstein et al. 2020, Larinier et al. 2020, Arnekleiv et al. 2007, Vikström 2016). En revanche, l'efficacité de dévalaison pour les plus petits ouvrages peut être très variable (par ex., bonne pour l'un, mauvaise pour l'autre, pour 2 ouvrages de tailles relativement proches sur la Versoix dans Grimardias & Cattaneo 2016).

Concernant les mesures de protection / guidage, on retrouve plutôt les dispositifs de type « grille horizontale » (6 cas / 15), avec un espacement de 15 ou 20 mm, dans les 15 études concluant à une bonne efficacité de dévalaison. Sur ces 6 cas, 4 présentent une association « grille horizontale + by-pass ». Dans ces 15 études, seulement 3 cas présentent une « grille verticale ». Inversement, les ouvrages présentant une mauvaise efficacité de dévalaison sont davantage associés à un dispositif de type « grille verticale » (4 cas / 7), avec un espacement compris entre 15 et 30 mm, et une inclinaison entre 27 et 65°. Il ne faut pas pour autant en conclure que les grilles horizontales permettent une meilleure efficacité de dévalaison : notre synthèse repose sur peu de cas d'étude (13 cas de grille verticale, 12 cas de grille horizontale) et serait à compléter.

Dans la Table 7, qui résume les principales caractéristiques de 18 cas d'études, les cas d'ouvrages dont les dispositifs de guidage et/ou de dévalaison ont été classés comme « bons » sont au nombre de 4, et montrent des efficacités de passage > 80%, et même > 90% dans 2 études. Il s'agit de dispositifs de « bypass » ou d'exutoires de surface, vers lesquels

les poissons sont guidés par le biais d'une grille horizontale (2 cas) ou verticale (2 cas). Huit cas d'études ont été évalués comme « moyens », avec des efficacités de passage très variables d'un aménagement à l'autre, comprises entre 18% et 97% (voire 100% sur un aménagement via l'outil télémétrie seul ; 18% via l'outil RFID). L'interprétation est très différente selon le type d'ouvrage, les mesures de guidage et de dévalaison, et dépend davantage des perspectives d'amélioration mises en évidence par les auteurs en raison de dysfonctionnements évidents (ex : présence de blessures chez de nombreux individus malgré des efficacités de passage fortes). Enfin, les dispositifs considérés comme « mauvais » montrent des efficacités de passage comprises entre 11 et 65%, (médiane = 30%), avec des passages avérés de poissons par les turbines pour 5 des 6 études. Quatre études ont montré que la faible efficacité des by-pass étudiés est probablement due au débit trop faible et/ou à un mauvais emplacement ou une mauvaise détectabilité des by-pass par les poissons.

Contrairement aux dispositifs de montaison pour lesquels une évaluation précise de l'efficacité peut généralement être apportée, il est beaucoup plus complexe d'effectuer un suivi biologique robuste pour évaluer la dévalaison. En effet, dans une grande majorité de cas, le processus de dévalaison peut s'effectuer par différentes voies de passage, parfois nombreuses (par ex., 7 voies sur l'ouvrage de Richelien dans Grimardias & Cattaneo 2016, et jusqu'à 10 au niveau de l'ouvrage de Unkelmühle sur la Sieg, Økland et al. 2017, Havn et al. 2018) qu'il est très difficile, voire impossible d'évaluer en raison de la taille des installations et des débits concernés. Souvent, on ne dispose alors que de données partielles, propres à certaines espèces, pour certaines voies de dévalaison, ou encore pour certaines configurations hydrauliques. Il est par conséquent rarement possible de collecter suffisamment de données pour réaliser une appréciation exhaustive et ainsi constituer une documentation de référence sur le franchissement par dévalaison d'un obstacle hydroélectrique. Ceci rend la comparaison entre installations et technologies de dévalaison très complexe et met en évidence les importantes lacunes de connaissance qui subsistent encore à l'heure actuelle dans la compréhension des processus de dévalaison piscicole.

**Table 7 : Etudes ayant fait l'objet d'une évaluation de l'efficacité de passage et d'appréciation de la fonctionnalité de la dévalaison piscicole**

Cours d'eau	Nom de l'ouvrage	Type de protection/guidage	Mesure de dévalaison	Mesures de suivi	Nombre d'espèces détectées	Efficacité de passage (nb franchissements/nb dévalants, %)	Évaluation par les auteurs de la mesure de dévalaison	Commentaire
Le Fossau (CH)	Le Fossau	Grille Coanda		PIT-tagging	1	66.1	Moyen	Accumulation de matériel sur la grille
Gave d'Oloron (F)	Auterrive	Grille verticale inclinée	Exutoire de surface x2	PIT-tagging	1	83.6	Bon	
Sarine (CH)	Maigrauge	Grille verticale inclinée (x2)	Canal de dévalaison	PIT-tagging, caméra acoustique, échosondeur	5	14	Mauvais	Il s'agit d'une étude de dévalaison avant assainissement. Depuis, une mesure d'assainissement a été proposée.
Ätran (S)	Ätrafors	Grille ("rack"; sens non précisé)		Téléométrie, autre méthode	1	86	Moyen	Amélioration encore possible.
Seeache (A)	Laganda	Grille horizontale	Passé à fentes verticales + toboggan + ouverture de clapets (déversoirs) sur le barrage	PIT-tagging, téléométrie	25	PIT : > 40 %	Moyen	PIT : 77 % migrent par la PàP, 7 % par le toboggan, et au moins 20 % par le clapet au-dessus du barrage (panne de l'antenne qui ne permet pas d'évaluer correctement cette proportion). Le passage par les turbines n'a pas pu être évalué, mais avec des grilles fines de 20 mm, tous les individus de taille < 200 mm peuvent passer à travers, soit 25 % de l'effectif de la communauté. La dévalaison pour le déversoir (clapet) est sous-estimé, mais a priori efficace. En revanche, le nombre de jours où le passage est possible, qui dépend du débit, varie d'une année sur l'autre.

**Table 7 (suite)**

Cours d'eau	Nom de l'ouvrage	Type de protection/guidage	Mesure de dévalaison	Mesures de suivi	Nombre d'espèces détectées	Efficacité de passage (nb franchissements/nb dévalants, %)	Évaluation par les auteurs de la mesure de dévalaison	Commentaire
Seeache (A)	Ebewe	Grille horizontale	Passe à fentes verticales + toboggan + ouverture de clapets (déversoirs) sur le barrage	PIT-tagging, caméra acoustique, échosondeur, télémétrie, dispositif de piégeage	25	Télémétrie : 100 % (39/39) PIT : 18 %	Moyen	PIT : 47 % migrent par la PàP, 31 % par le toboggan, et 22 % par le clapet au-dessus du barrage. Les auteurs sont très réservés sur l'utilisation de la caméra Didson. Le passage par les turbines n'a pas été évalué, mais avec des grilles fines de 20 mm, tous les individus de taille < 200 mm peuvent passer à travers, soit 25 % de l'effectif de la communauté. La dévalaison par le déversoir (clapet) est sous-estimé, mais a priori efficace. En revanche, le nombre de jours où le passage est possible, qui dépend du débit, varie d'une année sur l'autre.
Saale franconienne (D)	Lindesmuehle	Grille horizontale	Passe à poisson naturelle (montaison) + canal / goulotte de dévalaison + 'flap gate'	Dispositif de piégeage	17	26.8	Mauvais	Une part non négligeable des poissons passent à travers les grilles en direction de la turbine. La faible efficacité des by-pass étudiés est probablement due au fait que le débit était trop faible et que l'emplacement ou la détectabilité des by-pass était défavorable.
Regnitz (D)	Baiersdorf-Wellerstadt	Grille verticale inclinée	Passe à fentes verticales + canal de dévalaison	Dispositif de piégeage	19	11.7	Mauvais	Une part non négligeable des poissons passent à travers les grilles en direction de la turbine. La faible efficacité des by-pass étudiés est probablement due au fait que le débit était trop faible et que l'emplacement ou la détectabilité des by-pass était défavorable.

**Table 7 (suite)**

Cours d'eau	Nom de l'ouvrage	Type de protection/guidage	Mesure de dévalaison	Mesures de suivi	Nombre d'espèces détectées	Efficacité de passage (nb franchissements/nb dévalants, %)	Évaluation par les auteurs de la mesure de dévalaison	Commentaire
Alz (D)	Hoellthal	Grille verticale inclinée	Turbine de type 'vis d'Archimède'	Dispositif de piégeage	10	33.6	Mauvais	Une part non négligeable des poissons passent à travers les grilles en direction de la turbine. La faible efficacité des by-pass étudiés est probablement due au fait que le débit était trop faible et que l'emplacement ou la détectabilité des by-pass était défavorable.
Roisach (D)	Großweil	Grille installée horizontalement au dessus du puit des turbines	2 passes à poisson à fentes verticales + un exutoire de surface + un exutoire de fond	Dispositif de piégeage	18	65.1	Mauvais	Une part non négligeable des poissons passent à travers les grilles en direction de la turbine. La faible efficacité des by-pass étudiés est probablement due au fait que le débit était trop faible et que l'emplacement ou la détectabilité des by-pass était défavorable.
Ätran (S)	Herting	Grille horizontale	Full-depth by-pass + nature-like fishway	Téléométrie, autre méthode	1	95 (56/59)	Bon	
Ätran (S)	Herting	Grille horizontale	Full-depth by-pass + nature-like fishway	Téléométrie, piégeage	13	94 (33/35)	Bon	
Sieg (D)	Unkelmühle	Grille verticale inclinée	Passé à fentes verticales + Passé à poisson naturelle + Passage à canoë + vanne déversoir + vanne "de glace" + canal / goulotte de dévalaison + exutoire de fond et latéral (bypass)	Téléométrie	1	87.2	Moyen	Pas de passage dans turbine car pas de traversée de la grille + blessures liées au bypass. Les vitesses de dévalaison sont calculées en amont, aval et réservoir. Il y a 10 voies de passage possibles à la dévalaison => complexité, évaluation globale.



**Table 7 (suite)**

Cours d'eau	Nom de l'ouvrage	Type de protection/guidage	Mesure de dévalaison	Mesures de suivi	Nombre d'espèces détectées	Efficacité de passage (nb franchissements/nb dévalants, %)	Évaluation par les auteurs de la mesure de dévalaison	Commentaire
Kinzig (D)	Gengenbach	Grille incurvée	Turbine amovible + rivière de contournement + Passe à poisson en enrochement + vanne de crue	Téléométrie	1	93,7-96,9	Moyen	On ne sait pas si les poissons passent à travers, au-dessus ou au-dessous la turbine
Sieg (D)	Unkelmühle	Grille verticale inclinée	Passe à fentes verticales + Passe à poisson naturelle + Passage à canoë + vanne déversoir + vanne "de glace" + canal / goulotte de dévalaison + exutoire de fond et latéral (bypass)	Téléométrie	1	97.1	Moyen	Il n'y a pas de mortalité par les turbines : la grille horizontale est efficace et ne permet pas aux smolts de passer. La mortalité est liée à des blessures possibles lorsque les smolts passent par le bypass, ou par une prédation accrue. Des débits plus élevés diminuent la mortalité des smolts au passage de la centrale. 10 voies de dévalaison sont possibles à Unkelmühle.
Sieg (D)	Buisdorf (seulement seuil, pas de centrale hydroélectrique)		Rivière de contournement + passe à fentes verticales + passe à poissons naturelle + passe à poisson de type rampe en enrochement + passe à canoë	Téléométrie	1	97.5	Moyen	Il n'y a pas de mortalité par les turbines : la grille horizontale est efficace et ne permet pas aux smolts de passer. La mortalité est liée à des blessures possibles lorsque les smolts passent par le bypass, ou par une prédation accrue. Des débits plus élevés diminuent la mortalité des smolts au passage de la centrale. 8 voies de dévalaison sont possibles Buisdorf.

**Table 7 (suite)**

Cours d'eau	Nom de l'ouvrage	Type de protection/guidage	Mesure de dévalaison	Mesures de suivi	Nombre d'espèces détectées	Efficacité de passage (nb franchissements/nb dévalants, %)	Évaluation par les auteurs de la mesure de dévalaison	Commentaire
Versoix (CH)	Vieille-Bâtie (usine Baumgartner)	Grille verticale	By-pass (canal / goulotte de dévalaison) Surverse latérale du canal d'amenée	PIT-tagging, Téléométrie	2	TRL_Ad : 17/21 = 81 % TRL_Smolt* : 109/115 = 95 % (+ 6/115 = 5 % par les turbines) TRF* : 75/91 = 82 % (+ 16/91 = 18 % par les turbines)	Bon	TRL_Ad : Bon TRF* : uniquement dans le canal d'amenée (pas possible de suivre dans le lit principal) L'ouvrage de dévalaison est efficace, mais pas la mesure de protection (passage par les turbines important + mortalité)
Versoix (CH)	Richelien (usine Estier)	Grille verticale	Passe à poisson à fentes verticales + déversoir Chenal de contournement By-pass (canal / goulotte de dévalaison) Surverse latérale du canal d'amenée	PIT-tagging, Téléométrie	2	TRL_Ad : 18/47 = 38 % TRF_Smolt : 77/158 = 49 % (+ 64/158 = 41 % par les turbines) OBR : 4/7 = 57 % (mais effectif non représentatif)	Mauvais	TRL_Ad : Mauvais TRF : Moyen sur l'ensemble de l'ouvrage, mais mauvais lorsque les poissons transitent par le canal d'amenée, où seuls 61 % des individus utilisent alors les dispositifs de dévalaison (les autres, soit 39 %, passent par les turbines, avec un taux de mortalité de 98 %).

## **7 Recommandations pour l'évaluation des mesures d'assainissement**

Compte tenu de l'absence de critères d'évaluation standardisés, et tenant compte de la mise en œuvre récente d'un bon nombre de dispositifs dédiés à la dévalaison (qui sont pour certains encore en phase d'évaluation pilote), une amélioration des connaissances est indispensable avant de pouvoir apporter des appréciations objectives et robustes de leur réussite ou non. Pour ce faire, dans le cadre des contrôles des effets ordonnés lors de la mise en œuvre des mesures d'assainissement, le suivi de lignes directrices communes devrait autant que possible être systématiquement appliqué. Quelques recommandations en ce sens sont formulées ci-après.

### **7.1 Choix des espèces cibles**

Les dispositifs d'assainissement de la migration piscicole doivent être adaptés à toutes les espèces présentes et potentielles. Lors de la planification des mesures d'assainissement et du dimensionnement des ouvrages, une ou plusieurs espèces cibles sont sélectionnées sur la base de plusieurs critères (OFEV, 2022) :

- Les espèces présentes et potentielles représentatives de la zone de peuplement piscicole, les espèces spécifiques au type du cours d'eau et les espèces annexes, qui sont propres à des types de biotope ou de biocénose définis et qui présentent des exigences en matière d'habitat et de dispersion.
- Les espèces qui présentent les plus grands besoins en termes de dimensionnement du dispositif de dévalaison, de par leur taille par exemple (truite de lac, silure...), ou des besoins spécifiques, par exemple en termes d'hydraulique (chabot, spiralin).
- Les espèces migratrices pour lesquelles la dévalaison est une composante essentielle du cycle de vie (p. ex. anguille, lamproie).
- Les espèces menacées au sens de l'OLFP.
- Les espèces dites phares ou emblématiques qui servent la cause de la protection de la nature et jouent un rôle dans la sensibilisation du public (par ex., apron du Rhône, ombre commun).
- En ce qui concerne la dévalaison, ce sont principalement les espèces dont les populations sont menacées par la mortalité accrue due au passage des centrales hydroélectriques qui sont considérés comme espèces cibles (Ebel 2018). Il convient d'accorder une attention particulière aux espèces mobiles avec un taux de mortalité élevé lié aux turbines (p. ex. anguille, truite, ombre, nase, barbeau).

Les espèces cibles sélectionnées lors de la planification des mesures d'assainissement devraient ainsi logiquement être reprises en phase d'élaboration du concept de contrôle des effets et de l'interprétation des résultats du suivi. Néanmoins, plusieurs raisons peuvent justifier une modification ou un ajustement du choix de ces espèces, principalement dans les cas de figure suivants :

- L'espèce n'est pas encore présente pour être capturée, ou en effectif trop faible pour être détectée ou observée. Il est également possible que l'espèce ait un statut de menace et des perspectives de conservation peu compatibles avec des opérations de capture et de marquage. Dans ces cas, il convient de sélectionner une espèce cible de « substitution » présentant le plus de points communs avec l'espèce cible de référence.
- L'espèce a des caractéristiques morphologiques qui conviennent mal à la méthode de suivi employée (par ex., pour le marquage de certaines petites espèces).
- De nouvelles connaissances sont survenues entre la planification de la mesure d'assainissement et son contrôle d'efficacité (p. ex., une étude réalisée au niveau du haut Rhin montre que les espèces comme la brème commune et le silure, des migrateurs *a priori* de courte distance, se déplacent beaucoup et peuvent donc être considérées comme des espèces cibles ; Schwevers et al. 2019).
- Les connaissances sont jugées suffisantes pour une espèce et son évaluation n'est pas nécessaire.
- La prise en compte au moment du contrôle des effets de toutes les espèces cibles sélectionnées lors de la planification de la mesure d'assainissement induit des coûts jugés disproportionnés. Il est dans ce cas nécessaire d'effectuer une priorisation.

Dans le cas des grands cours d'eau, ou lorsque le spectre piscicole est diversifié, il est dans tous les cas nécessaire d'évaluer la pertinence de la sélection des espèces cibles. Il est recommandé d'agir en concertation avec le service cantonal compétent, si nécessaire avec l'OFEV, et éventuellement avec d'autres groupes d'intérêt. Le cas échéant, le choix de la méthode de suivi peut également être adapté au choix des espèces cibles retenues.

Les publications de Dönni et al. (2017) et WFN (2010) ainsi que la consultation de la base de données d'infoSpecies peuvent constituer des aides au choix des espèces cibles. La Table 8 ci-après dresse liste indicatrice des espèces pouvant être sélectionnées comme espèces cibles.

**Table 8 :** Liste des espèces piscicoles de Suisse et proposition de choix d'espèces cibles.

Nom scientifique	Nom allemand	Nom français
<i>Abramis brama</i>	Brachsmen	Brème franche
<i>Acipenser sturio</i>	Europäischer Stör	Esturgeon européen
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Schneider	Spirlin
<i>Alburnus alburnus</i>	Laube	Ablette
<i>Alburnus arborella</i>	Alborella	Alborella
<i>Alosa agone</i>	Agone	Agone
<i>Alosa alosa</i>	Maifisch	Alose (grande alose)
<i>Alosa fallax</i>	Cheppia	Cheppia (alose feinte)
<i>Anguilla anguilla</i>	Aal	Anguille
<i>Barbatula barbatula</i>	Bartgrundel/Schmerle	Loche franche
<i>Barbus barbus</i>	Barbe	Barbeau commun
<i>Barbus caninus</i>	Barbo canino	Barbo canino
<i>Barbus plebejus</i>	Barbo	Barbo
<i>Blicca bjoerkna</i>	Blicke	Brème bordelière
<i>Chondrostoma nasus</i>	Nase	Nase
<i>Chondrostoma soetta</i>	Savetta	Savetta
<i>Cobitis bilineata</i>	Cobite italiano	Cobite italiano
<i>Cobitis taenia</i>	Dorngrundel	Loche de rivière
<i>Coregonus spp.</i>	Felchen	Corégone
<i>Cottus gobio</i>	Groppe	Chabot
<i>Cyprinus carpio</i>	Karpfen	Carpe
<i>Esox cisalpinus</i>	Südlicher Hecht	Lucio cisalpino
<i>Esox lucius</i>	Hecht	Brochet
<i>Gasterosteus gymnurus</i>	Westlicher Dreistachliger Stichling	Epinoche à trois épines occidentale
<i>Gobio gobio</i>	Gründling	Goujon
<i>Gobio obtusirostris</i>	Kurzschnäuziger Gründling	Goujon à tête obtuse
<i>Gymnocephalus cernua</i>	Kaulbarsch	Grémille
<i>Hucho hucho</i>	Huchen	Huchon
<i>Lampetra fluviatilis</i>	Flussneunauge	Lamproie de rivière
<i>Lampetra planeri</i>	Bachneunauge	Lamproie de Planer
<i>Lampetra zanandreaei</i>	Piccola lampreda	Piccola lampreda
<i>Leucaspis delineatus</i>	Moderlieschen	Able de Stymphale (de Heckel)
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Hasel	Vandoise
<i>Lota lota</i>	Trüsche	Lotte
<i>Misgurnus fossilis</i>	Moorgrundel/Schlammpeitzger	Loche d'étang

Nom scientifique	Nom allemand	Nom français
<i>Padogobius bonelli</i>	Ghiozzo	Ghiozzo
<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Sofie	Soiffe, sofie, toxostome
<i>Perca fluviatilis</i>	Egli/Flussbarsch	Perche
<i>Petromyzon marinus</i>	Meerneunauge	Lamproie marine
<i>Phoxinus lumaireul</i>	Sanguinerola italiana	Sanguinerola italiana
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Elritze	Vairon commun
<i>Rhodeus amarus</i>	Bitterling	Bouvière
<i>Romanogobio benacensis</i>	Gobione italiano	Gobione italiano
<i>Rutilus aula</i>	Triotto	Triotto
<i>Rutilus pigus</i>	Pigo	Pigo
<i>Rutilus rutilus</i>	Rotaugé	Gardon
<i>Sabanejewia larvata</i>	Cobite mascherato	Cobite mascherato
<i>Salaria fluviatilis</i>	Cagnetta	Blennie fluviatile
<i>Salmo cenerinus</i>	Trota fario	Truite adriatique ou fario
<i>Salmo labrax</i>	Schwarzmeerforelle oder Donauforelle	Truite de la mer noire ou danubienne
<i>Salmo marmoratus</i>	Marmorataforelle	Truite marbrée
<i>Salmo rhodanensis</i>	Zebraforelle	Truite zébrée
<i>Salmo salar</i>	Atlantischer Lachs	Saumon atlantique
<i>Salmo trutta</i> (f. fario)	Atlantische Forelle	Truite atlantique fario
<i>Salmo trutta</i> (f. fluviatilis)	Flussforelle	Truite atlantique fluviatile
<i>Salmo trutta</i> (f. lacustris)	Seeforelle	Truite lacustre
<i>Salmo trutta</i> (f. marinus)	Meerforelle	Truite de mer
<i>Salvelinus neocomensis</i>	Jaunet	Jaunet
<i>Salvelinus profundus</i>	Tiefseesaibling	Tiefseesaibling
<i>Salvelinus umbla</i>	Seesaibling	Omble chevalier
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotfeder	Rotengle
<i>Scardinius hesperidicus</i>	Scardola italiana	Scardola italiana
<i>Silurus glanis</i>	Wels	Silure glâne
<i>Squalius cephalus</i>	Alet	Chevaine commun
<i>Squalius squalus</i>	Cavedano italiana	Cavedano italico
<i>Telestes muticellus</i>	Strigione	Strigione
<i>Telestes souffia</i>	Strömer	Blageon
<i>Thymallus aeliani</i>	Adriatische Äsche	Ombre du sud des Alpes
<i>Thymallus thymallus</i>	Äsche	Ombre commun
<i>Tinca tinca</i>	Schleie	Tanche

Nom scientifique	Nom allemand	Nom français
<i>Zingel asper</i>	Apron	Apron

	Espèces éteintes à évaluer au cas par cas.
	Espèces cibles à sélectionner en priorité si les effectifs sont suffisants.
	Espèces cibles à sélectionner selon les objectifs de conservation des peuplements et intérêts locaux.
	Espèces facultatives à sélectionner selon représentativité du spectre piscicole, disponibilités des espèces cibles et objectifs du suivi.

## 7.2 Effectifs à considérer

Il n'est pas possible d'être très précis sur la formulation d'un effectif de poissons devant être considéré lors de la planification ou de l'évaluation d'un contrôle des effets. Cela dépend de nombreux facteurs tels que la taille du cours d'eau, la densité des peuplements piscicoles, les possibilités de capture des poissons, la durée de l'étude, les aspects éthiques, la méthode de suivi employée, etc. Néanmoins, sur la base de l'analyse de la littérature et de nos expériences propres, les recommandations générales suivantes pourront être considérées :

- Dans le cas de l'utilisation de la télémétrie radio ou acoustique, où on cible une espèce, les effectifs sont « plutôt faibles », de l'ordre de quelques dizaines d'individus marqués (de 40 à 603 individus dans les cas analysés ; médiane = 136 ind. ; P25 = 62 ; P75 = 249). Cet effectif résulte généralement d'un compromis entre la robustesse / précision souhaitée des résultats et le coût de l'étude, tout en gardant à l'esprit que le marquage est une procédure invasive et que pour des raisons d'éthique, on vise l'effectif minimal permettant de répondre aux objectifs. Dans tous les cas, on va chercher à maximiser la probabilité de détection des individus marqués, et par conséquent, on aura d'autant plus tendance à **augmenter l'effectif initial qu'on a identifié de facteurs limitant la probabilité de détection**. On peut schématiquement admettre, pour le suivi d'une espèce cible pendant une saison de dévalaison, qu'un effectif « plutôt élevé » doit être priorisé si 1) l'ouvrage est très complexe, et présente de nombreuses voies de passage, 2) les conditions environnementales perturbent la qualité de détection du signal radio / acoustique, 3) la dévalaison d'effectue sur une période longue (plusieurs mois), 4) l'espèce présente une propension « modérée » à migrer ou la fraction migrante, variable d'une population à l'autre pour une même espèce, peut être « faible ». D'une manière

générale, en l'absence d'information sur les taux de migration escomptés, nous recommandons de considérer qu'une partie des individus marqués n'apportera pas d'information (mortalité, sortie de la zone d'étude, perte de la marque...): par conséquent, une majoration de **l'effectif marqué de 20 à 30 %** paraît réaliste pour assurer une bonne robustesse des résultats.

- Dans le cas de l'utilisation du PIT-tagging, le nombre d'individus marqués est élevé, généralement plusieurs centaines, que ce soit pour une espèce cible ou pour un ensemble d'espèces d'une communauté (dans les cas étudiés, de 167 à 2 433 ind., avec une médiane de 814 ind. ; P25 = 314 ; P75 = 1343). Le coût des marques n'étant pas limitant et la méthode étant peu invasive, c'est surtout la disponibilité du matériel biologique qui peut s'avérer limitante. Comme pour la télémétrie, la robustesse / précision des résultats en PIT-tagging dépend du taux de détection des individus, or celui-ci peut être relativement faible. Il n'est pas rare d'avoir des taux de détection compris entre 20 et 35 % (Grimardias & Cattaneo 2016 ; Havn et al. 2018 ; Rauch & Unfer 2019 ; Zurwerra et al. 2019 ; Rauch et al. 2020), voire parfois très inférieurs (Unfer & Rauch 2019). Cela signifie qu'entre 1 individu sur 3 et 1 individu sur 5 est détecté, autrement dit qu'il faut prévoir un effectif 3 à 5 fois plus important que l'effectif « souhaité » pour la robustesse / précision des résultats. Par exemple, dans le cas de la Versoix, où l'évaluation portait sur 2 ouvrages distants de quelques kilomètres, offrant respectivement 4 (Vieille-Bâtie) et 7 (Richelien) voies de passage à la dévalaison, seuls 530 individus sur un total de 2 433 marqués ont été détectés (21.8 %). Cet effectif s'est avéré adéquat pour permettre des estimations robustes de l'utilisation de chacune des voies de passage (Grimardias & Cattaneo 2016). En approximation « très grossière », on pourrait espérer, si le flux se répartit équitablement, une moyenne de 48 ind. détectés par voie de passage (530 ind. / 11 voies de passage). Si cela n'est évidemment pas la réalité, cela présuppose néanmoins, compte tenu de la dissymétrie des flux dévalants, de prévoir des effectifs « théoriques » suffisants pour avoir une estimation jugée fiable de l'efficacité de chaque voie de passage. Par conséquent, nous pouvons recommander, en termes d'effectifs, de 1) considérer un taux de détection relativement bas, compris entre 20 et 35 % environ pour les espèces à migration facultative ; 2) prédéfinir un effectif « théorique moyen » minimal attendu par voie de passage ; 3) favoriser une fraction d'individus transloqués (20-30% de l'effectif total) de l'aval de l'ouvrage vers l'amont de manière à favoriser leur comportement de dévalaison et réduire ainsi l'effectif à marquer.



Dans le cas des études de pit-tagging, on peut également s'appuyer sur les recommandations de Ecqua (2024), qui incluent aussi les dispositifs de montaison.

### 7.3 Classes de taille cibles

Pour la plupart des espèces, les déplacements / migrations en dévalaison concernent une large gamme de tailles, y compris des juvéniles. Grâce à l'étude de 4 ouvrages équipés de dispositifs de piégeage, Knott et al. (2023) montrent que 96 % des individus dévalants ont une taille < 20 cm. Ils montrent également que les tailles moyennes des individus dévalants se situent aux alentours de 8 à 12 cm selon la voie de passage considérée, ce qui suggère, compte-tenu des écart-types présentés, que de nombreux individus de taille beaucoup plus petite sont également présents dans ces échantillons. Par conséquent, il est important, dans le cadre du suivi de l'efficacité des mesures de dévalaison, de pouvoir évaluer la dévalaison de l'ensemble des classes de taille présentes dans la communauté (incluant les 0+, poissons de moins de 1 an, à faible capacité de nage), bien que cela soit techniquement complexe.

Cela implique par exemple, si la méthode utilisée repose sur des dispositifs de piégeage, d'utiliser des filets / nasses permettant la **capture des petits individus** (par ex., adaptation du vide de maille). Des **tests préalables** sont à recommander de manière à veiller que le dispositif n'entraîne pas une mortalité excessive des poissons capturés, les individus juvéniles (notamment < 5-6 cm) étant particulièrement sensibles (Zaugg & Mendez 2018 ; Unfer & Rauch 2019). Les méthodes reposant sur du marquage (PIT-tagging et télémétrie) peuvent s'avérer limitées dans le cas des petits individus. Néanmoins, le PIT-tagging permet de marquer sans surmortalité des individus **à partir de 55 mm pour la truite** (Richard et al. 2013) avec des tags de 12 mm. Des tests seraient à effectuer sur d'autres espèces, voire avec l'utilisation de tags plus petits (8 mm), mais pour ces derniers les capacités de détection à distance s'amenuisent. La télémétrie radio/acoustique, en revanche, s'avère moins appropriée pour les 0+, car le poids de la marque devient limitant dès lors qu'on veut un suivi sur quelques semaines ou quelques mois : il est recommandé de ne pas excéder un ratio « poids du tag / poids du poisson » de 2% (Winter, 1983), bien que certaines études relatent avec succès des taux de 6 à 12% sur des smolts (par ex., Brown et al., 1999).

## 7.4 Origine du matériel biologique

Dans la mesure du possible, notamment pour les suivis reposant sur des méthodes de marquage (PIT-tagging, télémétrie radio/acoustique, autre méthode de marquage ; mais parfois aussi pour des dispositifs de piégeage), il est fortement recommandé d'utiliser des poissons dits « sauvages », provenant de la rivière. Ces individus ont grandi dans un certain contexte environnemental, abiotique et biotique, qui a influencé leur comportement et présuppose que celui-ci est « naturel » (il représente le comportement de l'espèce dans ce milieu). Selon le cas, l'effectif capturable de poissons sauvages peut néanmoins être limité. En cas d'effectif insuffisant, il peut être fait recours (en remplacement, ou en complément de poissons sauvages) à des poissons d'élevage, issus de pisciculture. C'est notamment le cas pour la truite, espèce pour laquelle il est possible de se procurer des individus d'âge / taille défini(e), pour les formes résidente et lacustre. L'utilisation de poissons issus de pisciculture **n'est pas le choix prioritaire**, mais plutôt un choix « par défaut », notamment du fait des conditions d'élevage qui sont différentes du milieu naturel, et des modifications de comportement que l'élevage en captivité peut générer. La question se pose de savoir si les modifications de comportement (comportement social, agressivité...) observées chez les individus issus d'élevage se retranscrivent sur le comportement migratoire et par exemple, sur le choix des voies de dévalaison. Les études faisant appel à des individus de pisciculture font généralement l'hypothèse que les comportements migratoires face à un obstacle ne diffèrent pas entre poissons sauvages et issus d'élevage (par ex., Grimardias & Cattaneo 2016), mais cette hypothèse serait à vérifier plus formellement *in situ* en comparant dans différentes situations le comportement de poissons d'élevage et de poissons sauvages. Une récente étude non encore publiée sur des smolts de saumon (*S. salar*) tend à mettre en évidence des différences de comportement migratoire entre individus « semi-sauvages » et issus d'élevage (S. Gingins, OFEV, comm. pers., d'après une étude de A. Peter, Fish Consulting GmbH).

Idéalement, l'efficacité de franchissement d'un ouvrage devrait pouvoir être évaluée sur des individus dits « naïfs », qui n'ont pas déjà eu à franchir l'obstacle par le passé. En effet, il a été montré qu'il existe un phénomène d'**apprentissage** qui permet à l'individu ayant déjà rencontré un obstacle de se diriger plus rapidement vers la / les voies de passage et d'améliorer ainsi le temps nécessaire au franchissement (Cooke & Hinch 2013, Hershey 2021). Utiliser des individus « naïfs » pour mesurer l'efficacité de franchissement permet d'avoir « une valeur minimale » d'efficacité, non biaisée par le phénomène d'apprentissage. Cette valeur reflète davantage la réelle efficacité technique de l'ouvrage, et prend en compte le fait qu'une communauté est nécessairement composée d'individus qui n'ont encore jamais

été confrontés au franchissement de l'obstacle. En pratique, l'évaluation de l'efficacité de franchissement sur des individus naïfs ne peut se faire que par des méthodes de marquage, qui permettent de reconnaître ces individus des autres. Dans le cas d'utilisation de poissons sauvages, la **translocation** peut être un moyen efficace d'assurer la naïveté d'un lot de poissons marqués. Dans le cas de la dévalaison, la capture d'un lot d'individus suffisamment à l'aval de l'ouvrage suivi (dans le cours principal ou dans des affluents), et sa translocation à l'amont de l'ouvrage, est un protocole permettant généralement d'assurer une fraction migrante importante (les individus vont adopter un comportement dévalant pour rejoindre leur lieu de capture), et de maximiser la probabilité que ces individus soient naïfs. Dans le cas de l'utilisation de poissons issus d'élevage, la naïveté est assurée. La mise à l'eau de ces individus à l'amont de l'ouvrage à évaluer (avec parfois un lot à l'aval également), permet le suivi des voies de dévalaison, mais avec une fraction migrante qui peut être très variable.

## 7.5 Durée du suivi

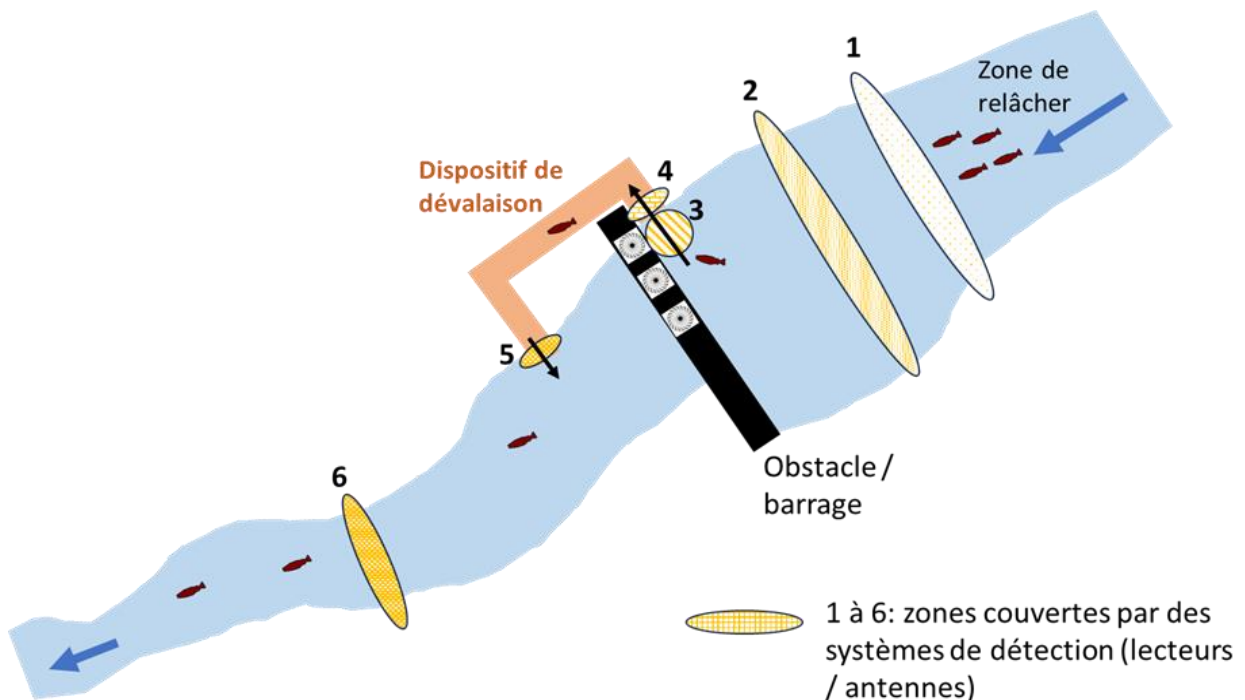
Les cas sélectionnées dans le tableau de synthèse présentent une durée de suivi médiane de 24 mois, avec cependant une forte variabilité (de 1 à 84 mois ; P25 = 6.5 ; P75 = 24). Ces durées de suivi ne reflètent pas toujours le temps effectif des comptages / suivis puisque la plupart des observations n'ont eu lieu que sur une partie de l'année seulement (souvent au printemps et à l'automne). Peut-être est-il dès lors plus pertinent de considérer des saisons, ou années, de suivi de dévalaison. Nous pouvons néanmoins noter que les études portant sur une seule année de dévalaison sont plutôt rares, la grande majorité évaluant au moins 2 années de dévalaisons. Nous recommandons, en effet, **un suivi minimal de 2 années (idéalement au moins 3)**, dans la mesure où la phénologie et l'intensité des processus migratoires (montaison et dévalaison) varient grandement en fonction des conditions hydro-climatiques (hydrologie et température) et des dynamiques de populations (% des différentes cohortes dans chaque population).

## 7.6 Exemple de protocole d'évaluation de la dévalaison basé sur les méthodes de marquage

Le contrôle de la dévalaison requiert la définition d'indicateurs prenant la forme de métriques comportementales (Ovidio et al., 2017) permettant de mesurer la performance des différentes étapes de ce processus migratoire (cf. Table 6), et d'identifier le cas échéant le ou

les point(s) de blocage constituant des entraves à la dévalaison ou des phénomènes de retard.

La norme européenne FprEN 17233:2020 (F) répertorie les différents « points d'écoute » (ou récepteurs) d'un système de suivi de la montaison ou de la dévalaison par un dispositif télémétrique ou RFID et le niveau d'information obtenu au cours de chacune des étapes. Le dispositif proposé (Figure 7) inclut le déploiement de 6 récepteurs, numérotés de 1 à 6 dans le sens du courant (= ici, le sens de la dévalaison). Les différents indicateurs sont similaires pour la dévalaison ou la montaison.



**Figure 7 :** Dispositif standardisé de suivi de la migration piscicole (ici présenté pour la dévalaison) au niveau d'un ouvrage équipé d'un dispositif de franchissement, tel que proposé dans la norme européenne FprEN 17233:2020 (F).

La Table 9 ci-dessous détaille le positionnement des différents récepteurs, et les indicateurs qu'ils permettent de calculer.

**Table 9 :** Positionnement des dispositifs de détections (récepteurs / antennes) nécessaires pour l'évaluation des indicateurs d'efficacité d'un dispositif de franchissement pour la dévalaison (adapté de CEN, 2021). Les chiffres correspondent aux positions des systèmes de détection représentées schématiquement à la **Figure 7**.

Niveau d'information	Emplacement du dispositif de détection					
	1. Amont ouvrage	2. Amont direct ouvrage	3. Voisinage entrée dispositif	4. Entrée dispositif	5. Sortie dispositif	6. Aval ouvrage
Fraction de poissons disponibles (= en dynamique de dévalaison)	(X)	X				
Attractivité du dispositif		X	X			
Accessibilité du dispositif			X	X		
Franchissabilité du dispositif				X	X	(X)
<b>Efficacité globale du dispositif</b>	<b>(X)</b>	<b>X</b>			<b>X</b>	<b>(X)</b>

X information indispensable; (X) information souhaitable

Concernant les suivis de migration piscicole mis en place après l'assainissement des ouvrages, il nous semble important d'évaluer la fraction migrante de la population suivie (par ex., Grimardias et al., 2022), notamment dans le cas de marquages PIT-tag ou télémétriques. En effet, lorsque les poissons marqués sont relâchés, une partie peut migrer vers l'amont (Rauch et al., 2019), une partie peut rester sur place (Vikström, 2016), et une partie peut migrer vers l'aval, même s'il s'agit d'une espèce qui devrait *a priori* présenter un comportement de dévalaison au moment du lâcher. L'estimation de la fraction d'individus qui dévalent effectivement le tronçon étudié permet de calculer avec plus de précision l'efficacité du dispositif de guidage et du dispositif de dévalaison (cf. Norme européenne FprEN 17233:2020 (2020)). Sans l'information sur la fraction migrante de la population suivie, l'attractivité et la franchissabilité globale peuvent être sous-estimée puisque le nombre d'individus à proximité de l'entrée du dispositif (pour l'accessibilité) ou à la sortie du dispositif (pour l'efficacité globale) est rapporté au nombre total d'individus marqués et pas au nombre d'individus qui présentent un comportement de dévalaison. Pour une évaluation correcte de la fraction migrante, deux récepteurs à l'amont de l'ouvrage sont nécessaires, avec une distance « suffisante » entre les deux pour bien caractériser un comportement de dévalaison.

Outre les différents indicateurs présentés en Table 9, deux indicateurs additionnels sont utilisés (définition d'après CEN, 2021) :

- **Le taux de repli** : pourcentage de poissons qui repartent en amont après avoir franchi un obstacle en dévalaison, soit par le dispositif de franchissement, soit par un autre itinéraire (CEN, 2021). Ceci implique alors un suivi du dispositif de montaison. Les individus faisant demi-tour avant d'atteindre le barrage sont inclus dans l'estimation de la fraction non-migrante de la population.
- **La durée de franchissement** de l'obstacle : temps écoulé entre le moment où un poisson s'approche pour la première fois d'un obstacle et le moment où il parvient à le franchir par n'importe quel itinéraire.

Sur la Figure 7, les récepteurs 1 et 4 sont généralement considérés comme facultatifs : le récepteur 1 apporte des informations sur le taux de repli ; le récepteur 6 permet de s'assurer que les individus ont poursuivi leur trajectoire de dévalaison après franchissement du dispositif. En revanche, les récepteurs 2 à 5 apportent chacun un niveau d'information différent et complémentaire. Si la franchissabilité reste l'indicateur le plus fréquemment décrit dans la littérature et demandé par les gestionnaires soucieux de démontrer l'efficacité des mesures de restauration de la migration piscicole, l'attractivité et l'accessibilité apportent des informations connexes, sur la capacité du poisson à identifier et à s'engager dans le dispositif de franchissement.

Si le dispositif proposé ci-dessus (Figure 7) est valide pour les méthodes de télémétrie et de PIT-tagging, il faut néanmoins noter que sa mise en œuvre opérationnelle peut rencontrer des difficultés. En particulier, dans le cas de l'utilisation du PIT-tagging, la largeur de la lame d'eau et / ou la profondeur peu(ven)t s'avérer limitante(s), en particulier pour les récepteurs 1, 2 et 6. Dans ce cas, la fraction migrante ne pourra pas être évaluée. Parfois, une antenne RFID en position 3 peut également être difficile à installer. Dans ce cas, l'attractivité ne peut être évaluée. Un moyen de pallier ces difficultés est de combiner marquage RFID et télémétrie (cf. Grimardias et al. 2022). La télémétrie est utilisée pour les points 1, 2, (3) et 6, le PIT-tagging pour les points 4 et 5. Les individus marqués par télémétrie subissent un double-marquage (+ PIT), et permettent d'évaluer la fraction migrante, l'attractivité, ainsi que de contrôler la poursuite du processus de dévalaison tout en participant à l'évaluation de l'accessibilité et de la franchissabilité.

## 7.7 Vers une élaboration d'un concept de contrôle des effets

Sur la base des points précédemment listés, différentes propositions de concept de contrôle des effets des mesures d'assainissement de la dévalaison peuvent être établis. Il est important de rappeler que le concept doit découler des objectifs prioritaires à évaluer (mesures d'un flux d'individus / évaluation d'une efficacité de passage par les différentes voies), et doit aussi s'appuyer sur diverses recommandations :

- Utiliser et suivre les lignes directrice figurant dans le modèle proposé sur la plateforme Renaturation : « Concept du contrôle biologique des effets pour la restauration de la migration des poissons »<sup>6</sup>. Ces lignes directrices permettent notamment d'apporter des précisions sur l'ouvrage, la faune piscicole concernée ainsi que les mesures d'assainissement mises en œuvre et faisant l'objet du contrôle ;
- Compléter les champs et listes de données mis en évidence dans le cadre du présent mandat (cf. 5.1 Description du tableau de synthèse) ;
- Recueillir les informations minimales sur les méthodes et indicateurs de contrôle employés ainsi que sur les espèces cibles et objectifs. Dans ce contexte et pour que l'évaluation de la dévalaison puisse être appréciée dans un corridor global, plusieurs parties d'un ouvrage devaient être analysées distinctement, en particulier sur les grandes installations. Il est donc important de pouvoir documenter séparément ces analyses. Un exemple est présenté dans le tableau ci-dessous.

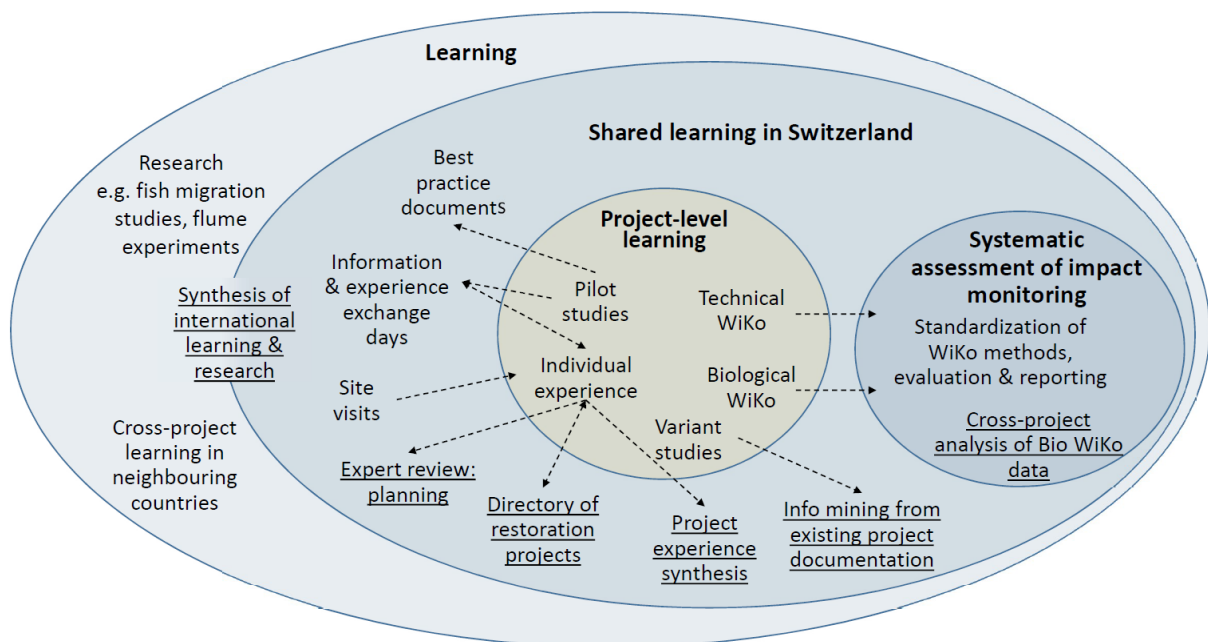
Partie de l'ouvrage suivi	Fonction	But du dispositif	Espèce, stade, taille cible	Méthode(s) de suivi	Indicateurs(s) de suivi	Objectif cible
Grille, paroi plongeante, répulsif, etc.	Protection/guidage	Empêche les poissons de passer au travers des turbines	Cf. chapitre 7	Cf. Table 6	Cf. chapitre 6.1	Valeur cible ou plage de valeur visée, éventuellement par rapport à une valeur de référence.
By-pass, canal, turbine, vanne, etc.	Transfert	Assurer le passage des poissons à l'aval de l'obstacle				
Fosse, bassin, etc.	Réception	Garantir une profondeur d'eau suffisante pour éviter que les poissons ne se blessent.				

<sup>6</sup> <https://plattform-renaturierung.ch/fr/migration-piscicole/aides-de-travail/contenus-modele-contrôle-biologique-des-effets/>

Des informations complémentaires plus précises sont également disponibles dans le Guide du contrôle d'efficacité des mesures d'assainissement (Zaugg et al. 2016) ainsi que dans la publication de la DWA (2021).

## 8 Conclusion et perspectives

Ce travail a mis en évidence la difficulté d'élaborer des recommandations générales en matière de suivi de l'efficacité des mesures de dévalaison. Cela est notamment dû à la diversité des ouvrages hydroélectriques et des solutions de dévalaison (incluant protection / guidage et transfert) mises en œuvre, à leur conception propre et caractéristiques hydrauliques, aux différents comportements des espèces piscicoles, à l'efficacité et aux contraintes des différentes méthodes de suivi employées, etc... La poursuite de la recherche et l'amélioration des connaissances dans le domaine de la dévalaison sont indispensables pour parvenir à élaborer des critères fiables et robustes d'évaluation du succès de mesures d'assainissement. Plusieurs projets de suivis biologiques sont en cours et d'autres seront mis en œuvre durant ces 5 prochaines années en Suisse. La prise en compte de l'expérience acquise dans le cadre de projets pilotes, d'études académiques ainsi que de la littérature internationale demeure malgré tout incontournable. Le principe de cette vue d'ensemble ainsi que du partage des connaissances a notamment été synthétisé par Tim Alexander (2023) dans la Figure 8 ci-après.



**Figure 8 :** Schéma du partage d'informations et d'amélioration des connaissances sur la migration piscicole (Alexander 2023).

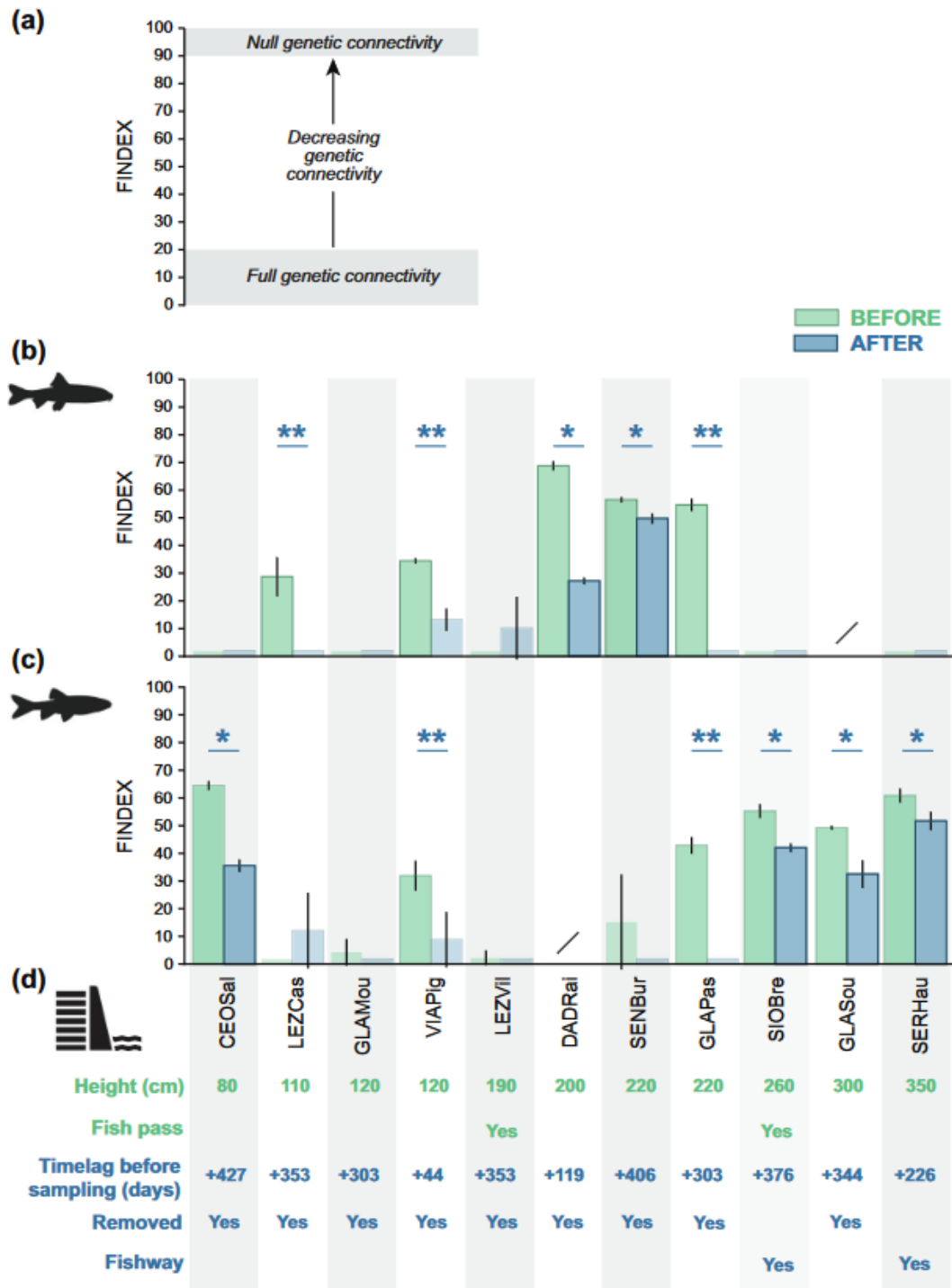


En perspective, 3 pistes peuvent être proposées, décrites ci-dessous :

- **Poursuivre la constitution d'une base de données « retours d'expérience ».** En effet, la présente synthèse participe à l'élaboration d'un bilan sur la base d'expériences acquises, mais les ouvrages de dévalaison déjà assainis, et pour lesquels un suivi biologique est disponible, sont très peu nombreux. Il sera donc nécessaire de compléter le tableau de synthèse proposé dans ce travail, en implémentant de nouvelles études lorsque celles-ci seront disponibles, et en prenant soin de renseigner *a minima* les champs proposés. Cela suggère que ces informations soient disponibles dans les études, ce qui n'est pas le cas actuellement (nombreuses « cases vides » dans le tableau). La question se posera également de savoir s'il est nécessaire d'aller plus loin dans la description technique des ouvrages, notamment des voies de dévalaison (informations sur le dimensionnement, les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, etc., pour chacune des voies de dévalaison) ;
- **Compléter l'évaluation des effets des mesures d'assainissement par des indicateurs complémentaires, notamment génétiques.** Les indicateurs utilisés et décrits dans cette synthèse sont basés sur une vision écologique du fonctionnement d'une population, et visent à mesurer un flux ou une proportion d'individus qui migrent. La principale difficulté de cette approche est qu'on ne sait pas, pour beaucoup d'espèces, si cette migration est absolument nécessaire, ni quelle fraction minimale de la population devrait migrer pour en assurer la pérennité. De plus, pour une même espèce, les fractions migrantes peuvent être très différentes d'une population à l'autre. Ces raisons expliquent qu'il est très difficile de formuler des objectifs chiffrés de dévalaison par espèce. Une autre approche, complémentaire, vise à mesurer la connectivité génétique : les ouvrages sont des obstacles susceptibles de modifier la structure et la diversité génétique des populations piscicoles (Pavlova et al, 2017). On s'intéresse davantage au maintien d'un flux génétique et à l'absence de différenciation entre les groupes à l'amont et à l'aval de l'obstacle, plutôt qu'à un nombre d'individus, même si *de facto* il existe une relation entre flux d'individus et mesures génétiques (Torterotot & Caudron 2018). L'outil génétique apporte ainsi des informations sur le fonctionnement global de la population et sur la réduction des migrations (en montaison et/ou dévalaison). Récemment, un indice génétique standardisé ( $F_{INDEX}$ , permettant de comparer

les effets de la fragmentation entre ouvrages, indépendamment de leur âge, et entre populations amont et aval ayant des tailles efficaces potentiellement différentes) a été développé afin de mesurer spécifiquement les effets dus à la fragmentation par un ouvrage, ou d'évaluer l'efficacité de la restauration (création d'un dispositif de franchissement ou arasement de l'ouvrage ; Prunier et al. 2020, 2021). Cet indice, basé sur l'analyse de microsatellites, s'applique à toute espèce, hormis les grands migrateurs (les populations amont et aval ouvrage doivent pouvoir être identifiées). Il reflète la réduction du flux de gènes entre l'amont et l'aval due à la présence de l'ouvrage, exprimée en pourcentage (de 0 % = pas d'effet "barrière", à 100 % = barrière infranchissable). Les premiers tests réalisés sur un ensemble de 11 seuils (< 4 m de hauteur, plus ou moins franchissables en fonction de leur hauteur et de leur pente) avant et après restauration dans différentes rivières françaises, pour 2 genres (*Gobio* et *Phoxinus*, représentant 5 espèces), sont très concluants (Figure 9). L'indice quantifie le rétablissement de la connectivité écologique après restauration (y compris sur un pas de temps court après restauration, 10 mois en moyenne dans Prunier et al. 2023), et se montre plus performant que d'autres méthodes plus classiques d'analyse de génétique de populations (STRUCTURE, GeneClass 2, BAYESASS ; cf. Prunier et al. 2023).

- **Exploiter davantage les références compilées dans le travail de recherche bibliographique.** Plus de 500 références internationales ont été identifiées d'après les critères de recherche établis (cf. 4.1), or seule une petite minorité (27 études) a été retenue dans la présente synthèse. Notamment, le fait d'avoir sélectionné en priorité des études où des mesures d'assainissement de la dévalaison avaient été prises a grandement limité le nombre de cas. Il y aurait néanmoins beaucoup d'informations à extraire de l'ensemble des autres études, que ce soit sur des aspects méthodologiques de suivi, d'écoulement hydraulique et de comportement fin des espèces au niveau des dispositifs, de connaissance des comportements migratoires des espèces (distance, phénologie, fraction migrante, déterminants environnementaux...), voire d'indicateurs de dévalaison. Les approches méta-analytiques se développent ces dernières années en Ecologie, où on constate, malgré la quantité d'études disponibles, que des questions parfois assez « basiques » sont entourées d'incertitudes (notamment du fait de la difficulté de comparer les études entre elles). C'est notamment le cas concernant la migration piscicole.



**Figure 9** : Interprétation du F-INDEX (a) et principaux résultats du suivi génétique avant-après (b et c). Pour chaque barrière (en colonnes), les barres représentent les valeurs F-INDEX avec IC 95 % calculées avant (en vert) et après (en bleu) la restauration pour le genre *Gobio* (b) et *Phoxinus* (c). Les barres obliques indiquent l'absence de données pour un des deux genres. Les barres soulignées représentent des effets de barrière significatifs (INDEX F > 20 %). Les étoiles bleues indiquent un changement significatif des valeurs F-INDEX après restauration (CI 95% sans chevauchement). Les doubles étoiles bleues indiquent la récupération complète de la connectivité après restauration (voir détails en annexe S8). Le panneau (d) fournit également quelques détails sur les barrières (en vert) et la restauration (en bleu) pour les comparaisons avec les valeurs F-INDEX (voir tableau 1). Les barrières sont triées par hauteur croissante. (extrait de Prunier et al. 2023)

## 9 Références

- Aas, Ø. (Éd.). (2011). *Atlantic salmon ecology*. Blackwell Pub.
- Arnekleiv, J., Kraabol, M., Museth, J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout (*Salmo trutta* L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia*, 582, 5-15. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0547-8>
- Aromataris, E., & Pearson, A. (2014). The systematic review : an overview. *American Journal of Nursing*, 114(3), 53-58. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0000444496.24228.2c>
- ATV-DVWK (2004). Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Contrôle d’efficacité. Arbeitsgruppe WW-8.1. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. 255p.
- Boller, L. (2017). KW Waldhalde Monitoring Fischgängigkeit. Funktionskontrolle und Bewertung der Fischauf- und abstiegsanlagen. 29p.
- Breitenstein, M., Hoppler, L., Mendez, R. (2020). Kraftwerk Rüchlig AG Wiederherstellung der Fischwanderung. Fischabstieg Dotierkraftwerk. Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass. 59p.
- Brown, R.S., Cooke, S.J., Anderson, W.G. & McKinley, R.S. 1999. Evidence to challenge the “2% rule” for biotelemetry. *North American Journal of Fisheries Management*, 19: 867-871.
- Brujjs, M.C.M., & Durif, C.M.F. (2009). Silver eel migration and behaviour. In G. Van Den Thillart, S. Dufour, & J. C. Rankin (Éds.), *Spawning Migration of the European Eel* (p. 65-95). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9095-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9095-0_4)
- Calles, O., Elghagen, J., Nyqvist, D., Harbicht, A., Nilsson, P. (2021). Efficient and timely downstream passage solutions for European silver eels at hydropower dams. *Ecological engineering*, 170, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106350>
- Calles, O., Karlsson, S., Vezza, P., Comoglio, C., Tielman, J. (2013). Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater biology*, 58(10), 2168-2179. <https://doi.org/10.1111/fwb.12199>
- Capra, H., Pella, H., Ovidio, M. (2018). Individual movements, home ranges and habitat use by native rheophilic cyprinids and non-native catfish in a large regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 25(2), 136-149. <https://doi.org/10.1111/fme.12272>
- Capra, H., Plichard, L., Bergé, J., Pella, H., Ovidio, M., McNeil, E., Lamouroux, N. (2017). Fish habitat selection in a large hydropeaking river: strong individual and temporal variations revealed by telemetry. *Science of the total environment*, 578, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.155>
- Chasserieau, C., Beaufile, M., Grimardias, D., Lizee, M.H., Dumoutier, Q., Frossard, P.A., Bovy, V., Huchet, P., Grenier, R., Meglecz, E., Chappaz, R., Dubut, V., Cattaneo, F. (2015). Interreg IV A ESPACE Arve & Rhône – Vers une continuité écologique au-delà des frontières. Rapport final, 318p. + annexes

- Cooke, S. J., & Hinch, S. G. (2013). Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. *Ecological Engineering*, 58, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.005>
- Cuchet, M., Geiger, F., Sepp, A., Rutschmann, P. (2012). Fish downstream passage at the TUM-Hydro shaft power plant experimental study of fish behavior. *IAHR Europe Congress*, Munich.
- Dönni, W., Spalinger, L., Knutti, A. 2017: Protection des poissons migrateurs en Suisse. Espèces cibles, bassins versants prioritaires et actions à mener. Étude réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, 53 p.
- DWA – Themen: Auguste 2021: Methodische Grundlagen zur standörtlichen -Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstiegs. 244 p.
- Ebel, G. (2018). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung (3. Ausgabe). Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale), Deutschland.
- Fernandez Garcia, G., Corpetti, T., Nevoux, M., Beaulaton, L., & Martignac, F. (2023). AcousticIA, a deep neural network for multi-species fish detection using multiple models of acoustic cameras. *Aquatic Ecology*, 1-13.
- Grimardias, D. & Cattaneo, F. (2016). Assainissement de la libre migration piscicole : évaluation de l'efficacité de franchissement des ouvrages hydroélectriques sur la Versoix (GE). Rapport pour l'Office fédéral de l'environnement, 65 p.
- Grimardias, D., Chasserieau, C., Beauvils, M., Cattaneo, F. (2022). Ecological connectivity of the upper Rhône River: upstream fish passage at two successive large hydroelectric dams for partially migratory species. *Ecological Engineering*, 178, 106545. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106545>
- Guthruf, J. (2019). EK Fischwanderhilfe (FWH) Kraftwerk Lochmühle am Rotbach (Huttwil). 27p.
- Havn, T.B., Økland, F., Heermann, L., Thorstad, E.B., Teichert, M.A.K., Sæther, S.A., Tambets, M., Borcherding, J. (2018). Downstream migration of Atlantic salmon smolts at Unkelmühle power station and Buisdorf dam in 2016. NINA Report 1412. 38p.
- Heggenes, J., & Traaen, T. (1988). Downstream migration and critical water velocities in stream channels for fry of four salmonid species. *Journal of Fish Biology*, 32(5), 717-727. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1988.tb05412.x>
- Heiß, M. (2015). Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Master's thesis. 61p.
- Hershey, H. (2021). Updating the consensus on fishway efficiency: A meta-analysis. *Fish and Fisheries*, 22(4), 735-748.
- Klopries, E., Deng, Z., Lachmann, T., Schuttrumpf, H., Trumbo, B. (2018). Surface bypass as a means of protecting downstream-migrating fish: lack of standardised evaluation criteria complicates evaluation of efficacy. *Marine and freshwater research*, 69(12), 1882-1893. <https://doi.org/10.1071/MF18097>

- Knaepkens, G., Bruyndoncx, L., Eens, M. (2004). Assessment of residency and movement of the endangered bullhead (*Cottus gobio*) in two Flemish rivers. *Ecology of Freshwater Fish*, 13(4), 317-322. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2004.00065.x>
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J., Geist, J. (2019). Seasonal and diurnal variation of downstream fish movement at four small-scale hydropower plants. *Ecology of Freshwater Fish*, 29(1), 74-88. <https://doi.org/10.1111/eff.12489>
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J., Geist, J. (2020). Seasonal and diurnal variation of downstream fish movement at four small-scale hydropower plants. *Ecology of freshwater fish*, 29(1), 74-88. <https://doi.org/10.1111/eff.12489>
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J., Geist, J. (2023). Downstream fish passage at small-scale hydropower plants: turbine or bypass? *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1168473. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1168473>
- Larinier, M., Dumond, L., Lagarrigue, T., Frey, A., Travade, F. (2020). Performance of a large partial-depth guide wall to divert downstream migrating Atlantic salmon smolts at Tuilieres dam, Dordogne River. *Knowledge and management of aquatic ecosystems*, 421(15), 1-15. <https://doi.org/10.1051/kmae/2020010>
- Lelek, A. (1987). *Threatened Fishes of Europe*. Verlag nicht ermittelbar.
- Maddahi, M., Hagenbüchli, R., Mendez, R., Zaugg, C., Boes, R. M., Albayrak, I. (2022). Field investigation of hydraulics and fish guidance efficiency of a horizontal bar rack-bypass system. *Water*, 14(5), 776. <https://doi.org/10.3390/w14050776>
- Martignac F., Daroux A., Bagliniere J.-L., Ombredane D., Guillard J. (2015). The use of acoustic cameras in shallow waters: new hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology. *Fish and Fisheries* 16:486–510. <https://doi.org/10.1111/faf.12071>
- Munn, Z., Peters, M. D. J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 143. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Nettles, D. C., & Gloss, S. P. (1987). Migration of landlocked Atlantic Salmon Smolts and effectiveness of a fish bypass structure at a small-scale hydroelectric facility. *North American Journal of Fisheries Management*, 7(4), 562-568. <https://doi.org/10.1577/1548-8659>
- Norme européenne FprEN 17233:2020 (2020). Qualité de l'eau - Recommandations pour l'évaluation par télémétrie de l'efficacité des dispositifs de franchissement piscicole et d'indicateurs associés. 52p.
- Økland, F., Teichert, M.A.K., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Tambets, M., Borchering, J. (2017). Downstream migration of European eel at three German hydropower stations. NINA Report 1355. 60p.
- Økland, F., Teichert, M.A.K., Thorstad, E.B., Havn, T.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Diserud, O.H., Tambets, M., Hedger, R.D., Borchering, J. (2016). Downstream migration of Atlantic salmon smolt at three German hydropower stations. NINA Report 1203. 52p.

- OFEV (2022). Rétablissement de la migration du poisson. Exemples de bonnes pratiques pour les centrales hydroélectriques en Suisse. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement no 2205 : 112 p.
- Pander, J., Mueller, M., Geist, J. (2013). Ecological functions of fish bypass channels in streams: migration corridor and habitat for rheophilic species. *River research and application*, 29(4), 441-450. <https://doi.org/10.1002/rra.1612>
- Pavlov, D. S., Mikheev, V. N. (2017). Downstream migration and mechanisms of dispersal of young fish in rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74(8), 1312-1323. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0298>
- Pavlova, A., Beheregaray, L. B., Coleman, R., Gilligan, D., Harrisson, K. A., Ingram, B. A., Kearns, J., Lamb, A. M., Lintermans, M., Lyon, J., Nguyen, T. T. T., Sasaki, M., Tonkin, Z., Yen, J. D. L., Sunnucks, P. (2017). Severe consequences of habitat fragmentation on genetic diversity of an endangered Australian freshwater fish: a call for assisted gene flow. *Evolutionary Applications*, 10(6), 531-550. <https://doi.org/10.1111/eva.12484>
- Prunier, J. G., Loot, G., Veyssiere, C., Poulet, N., & Blanchet, S. (2021). Barrier mitigation measures trigger the rapid recovery of genetic connectivity in five freshwater fish species. *bioRxiv*, 2021-12.
- Prunier, J. G., Poesy, C., Dubut, V., Veyssi re, C., Loot, G., Poulet, N., & Blanchet, S. (2020). Quantifying the individual impact of artificial barriers in freshwaters: A standardized and absolute genetic index of fragmentation. *Evolutionary Applications*, 13(10), 2566-2581.
- Prunier, J. G., Loot, G., Veyssiere, C., Poulet, N., & Blanchet, S. (2023). Novel operational index reveals rapid recovery of genetic connectivity in freshwater fish species after riverine restoration. *Conservation Letters*, 16(2), e12939.
- Rauch, P., Pinter, K., Unfer, G. (2019). Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Teilbericht 3. Fallstudie Seeache. 165p.
- Rauch, P., Unfer, G. (2019). Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Teilbericht 4. Fallstudie Fritzbach & Kleinarler Ache. 104p.
- Richard A., Bergé J. & Bernard R., (2021). Etude de la dévalaison des truites au niveau de la prise d'eau du Fossau. Suivi par RFID. Energie Renouvelable Vouvry SA. 26 p.
- Richard, A., O'Rourke, J., Caudron, A., & Cattaneo, F. (2013). Effects of passive integrated transponder tagging methods on survival, tag retention and growth of age-0 brown trout. *Fisheries Research*, 145, 37-42.
- Schwevers U., Adam. B., Dersch F., Goepfert S., M gelt nder-L wenberg S. (2019). PIT-Tagging Hochrhein. Abschlussbericht im Auftrag des eidgen ssischen Bundesamtes f r Umwelt. 172 p.
- Sibley E. C. P., Madgett A. S., Elsdon T. S., Marnane M. J., Harvey E. S., Fernandes P. G. (2023) The capacity of imaging sonar for quantifying the abundance, species richness, and size of reef fish assemblages. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 717:157-179.
- Sonny, D., Beguin, J., Lerquet, M., Roy, R., Teichert, N., De Oliveira, E. (2020). Downstream fish migration along the low Meuse river. LIFE4FISH, Action D2, Part I. 27p.

- Stelkens, R. B., Jaffuel, G., Escher, M., Wedekind, C. (2012). Genetic and phenotypic population divergence on a microgeographic scale in brown trout. *Molecular Ecology*, 21(12), 2896-2915. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05581.x>
- Unfer, G., Rauch, P. (2019). Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Teilbericht 2. Fallstudie Thaya. 162p.
- Vikström, L. (2016). Effectiveness of a fish-guiding device for downstream migrating smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Piteälven, northern Sweden. Master's thesis. 30p.
- WFN (2010). Revalorisation des espèces de poissons litho-rhéophiles de Suisse. Fiches d'information sur la biologie et les mesures de revalorisation. Rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement. 52 p.
- Wilmsmeier, L., Schölzel, N., & Peter, A. (2019). Fischwanderung: Kontrollinstrument Zählbecken. *Die unterschätzte Bedeutung der Reusenkehle. Bundesamt für Umwelt (BAFU)*. 48 p.
- Winter, J.D. 1983. Underwater biotelemetry. In Nielsen, L. A. & Johnsen, J. D. eds., *Fisheries Techniques*. 371-395 pp. Bethesda, Maryland, American Fisheries Society.
- Wright, R. W., Brand, R. A., Dunn, W., Spindler, K. P. (2007). How to write a systematic review: *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 455, 23-29. <https://doi.org/10.1097/BLO.0b013e31802c9098>
- Zaugg, C. (2018). Axpo Kleinwasserkraft AG. Kleinwasserkraftwerk Stropfel. Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass. 104p.
- Zaugg, C., Boller, L., Dönni, W., Guthruf, J. (2015). Restauration de la migration des poissons. Guide du contrôle d'efficacité des mesures d'assainissement. 85p.
- Zurwerra, A., Richard, A., Escher, M., Brunner, D. (2019). Assainissement de l'ouvrage de dévalaison piscicole de la Maigrauge. Biomonitoring. Etude des variantes d'assainissement. 63p.