

**Interreg**  
**Sudoe**



## **GT 2 "Estimation des mortalités aux obstacles"**

*Délivrables 2.1.1 & 2.2.3*

**Quelles données collecter et comment  
estimer les mortalités d'anguilles dévalantes  
au niveau des aménagements hydroélectriques**

Février 2021

**Auteurs** : Mathilde LABEDAN & Pierre SAGNES

Office Français de la Biodiversité (OFB)



**Relecteurs/contributeurs** : María MATEO (AZTI), Cédric BRIAND (EPTB Vilaine), Dominique COURRET (OFB)

# Table des matières

<b>Glossaire</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	7
<b>1. Mortalités induites par les turbines et solutions pour les réduire</b> .....	9
1.1. Les différents types de turbines .....	9
1.2. Différentes solutions permettant de limiter la mortalité des anguilles durant la dévalaison .	12
1.2.1. Opérations de turbinage .....	12
1.2.2. Les turbines ichtyocompatibles.....	13
1.2.3. Capture – transport des poissons.....	15
1.2.4. Les barrières physiques : les grilles fines "ichtyocompatibles".....	15
<b>2. Approche méthodologique proposée dans ce guide</b> .....	18
<b>3. Données nécessaires pour établir un diagnostic de mortalité pour des anguilles dévalantes au niveau d'un aménagement hydroélectrique</b> .....	20
3.1. Évaluation du nombre d'individus se présentant au droit de l'aménagement et de leur taille	20
3.2. Proportion d'individus dévalant par les ouvrages évacuateurs de crue vs proportion d'individus entraînés dans la prise d'eau.....	21
3.2.1. Période de migration et débits correspondants .....	21
3.2.2. Débit réservé et débit d'équipement.....	22
3.3. Taux de mortalité au niveau des ouvrages évacuateurs .....	23
3.4. Efficacité du plan de grille.....	24
3.4.1. Taille des individus présents en amont de la centrale hydroélectrique .....	24
3.4.2. Vitesses d'écoulement à l'amont du plan de grille.....	24
3.4.3. Caractéristiques du plan de grille .....	25
3.4.4. Caractéristiques des exutoires .....	25
3.5. Éléments pour calculer le taux de mortalité au niveau des turbines.....	25
3.5.1. Taille des individus présents en amont de la centrale hydroélectrique .....	25
3.5.2. Caractéristiques des turbines.....	26
3.5.3. Débit d'équipement et débit turbiné par chaque turbine.....	26
3.5.4. Hauteur de chute.....	26
3.6. Tableau récapitulatif des différentes informations à connaître.....	26
<b>4. Établissement du diagnostic, méthodes de calcul</b> .....	28
4.1. Taux d'échappement au niveau des ouvrages évacuateurs de crue .....	28

4.1.1.	Phase 1 : Période globale de dévalaison et débits déclenchant les épisodes de dévalaison.....	28
4.1.2.	Phase 2 : Calcul des débits journaliers au droit de l'aménagement.....	31
4.1.3.	Phase 3 : Estimation de la proportion d'individus dévalant au niveau des ouvrages évacuateurs .....	32
4.1.4.	Phase 4 : Estimation de la part de débit déversée au niveau du seuil.....	37
4.2.	<b>Estimation de la mortalité au passage des ouvrages évacuateurs</b> .....	37
4.3.	<b>Efficacité du plan de grille et des exutoires associés (si existants)</b> .....	38
4.3.1.	Espacement libre maximal entre les barreaux.....	38
4.3.2.	Vitesse normale maximale admissible au niveau du plan de grille .....	39
4.3.3.	Inclinaison des plans de grilles inclinés .....	40
4.3.4.	Orientation des plans de grille orientés .....	40
4.3.5.	Recommandations pour les exutoires et les goulottes de dévalaison .....	41
4.3.6.	Exemples d'évaluations de l'efficacité de plans de grilles à dire d'expert .....	45
4.4.	<b>Calcul du taux de mortalité dans différents types de turbines</b> .....	47
4.4.1.	Turbines "ichtyocompatibles" .....	47
4.4.2.	Turbines Pelton .....	47
4.4.3.	Turbines Kaplan .....	47
4.4.4.	Turbines Francis.....	48
4.4.5.	Présence de plusieurs turbines dans une même prise d'eau .....	48
4.5.	<b>Bilan de la mortalité au niveau de l'ensemble de l'aménagement hydroélectrique</b> .....	49
4.6.	<b>Exemple d'un diagnostic à l'échelle d'un aménagement hydroélectrique</b> .....	50
4.6.1.	Etape 1 : Proportions d'individus dévalants par les ouvrages évacuateurs de crue et entraînés dans la prise d'eau.....	51
4.6.2.	Etape 2 : Taux de mortalité au niveau de l'ouvrage évacuateur.....	53
4.6.3.	Etape 3 : Efficacité du plan de grille.....	54
4.6.4.	Etape 4 : Calcul du taux de mortalité dans les turbines.....	54
4.6.5.	Etape 5 : Estimation de la mortalité totale à l'échelle de l'aménagement .....	55
4.7.	<b>Mortalité à l'échelle d'un axe ou d'un territoire</b> .....	55
	<b>Bibliographie</b> .....	58
	<b>ANNEXE - R code : mortalité dans les turbines</b> .....	64
1.	Calcul des mortalités pour une taille donnée.....	64
2.	Calcul des mortalités pour une matrice de classes de tailles.....	65

## Glossaire

*Ce glossaire présente, par ordre alphabétique, une définition sommaire des mots écrits en vert dans le document (lors de leur première apparition).*

**Amphihal(e)** : qualifie une espèce dont le cycle de vie alterne entre le milieu marin et les eaux douces.

**Anguille argentée** : dernier stade du cycle de vie de l'anguille européenne, sous lequel elle entreprend sa migration de dévalaison et le retour vers la mer des Sargasses.

**Anguille jaune** : stade de vie sous lequel l'anguille européenne effectue l'essentiel de sa croissance en milieu continental, avant de repartir en milieu marin sous sa forme argentée.

**Arcs branchiaux** : parties osseuses qui portent les branchies des poissons.

**Aube** : partie d'une turbine Francis, en forme de cuillère, sur laquelle s'exerce l'action du fluide moteur.

**Barrage** : ouvrage, fixe ou mobile, qui barre plus que le lit mineur d'un cours d'eau.

**Bassin versant** : espace géographique drainé par un cours d'eau et ses affluents.

**Biomasse** : poids de matière vivante.

**Canal d'amenée** : canal qui dérive l'eau d'un cours d'eau en direction d'une usine hydroélectrique.

**Centile** : chacune des 99 valeurs qui divisent les éléments d'une distribution statistique en 100 parties d'effectif égal (ou, par extension, chacune de ces 100 parties).

**Civelle** : forme juvénile de l'anguille européenne, qui arrive dans les estuaires et amorce la montaison dans la partie aval des bassins versants.

**Débit d'équipement** : débit transitant par les turbines en fonctionnement nominal (pleine puissance).

**Débit classé (Qx)** : pour un cours d'eau donné à une station donnée, le débit moyen journalier est inférieur X jours sur 100 au débit classé Qx. Par exemple, pour caractériser les fortes valeurs de débit d'un cours d'eau, on utilise classiquement les débits classés Q75, Q90, Q95, Q97.5 et Q99.

**Débit réservé** : il s'agit du débit minimal réglementaire d'eau (parfois exprimé en pourcentage du débit total moyen) que les propriétaires ou gestionnaires d'un ouvrage hydraulique (barrage, seuil, aménagement hydroélectrique...) doivent réserver au cours d'eau pour un fonctionnement minimal des écosystèmes qui lui sont liés. Il doit notamment permettre le maintien des conditions de vie pour les poissons et les invertébrés et, en saison de reproduction, la préservation des frayères.

**Débit turbiné** : débit d'eau transitant par une ou plusieurs turbine(s).

**Dévalaison** : migration des poissons (ici les anguilles argentées, voire jaunes) vers l'aval des bassins versants.

**Échappement** : nombre (ou proportion) d'individus parvenant à éviter les turbines, que ce soit en passant par les ouvrages évacuateurs de crues ou les exutoires.

**Évacuateurs de crues** : organes ou parties de l'ouvrage qui permettent le transit des crues à travers l'aménagement, tout en contrôlant les côtes maximales atteintes de manière à ce qu'elles restent inférieures aux côtes assurant la stabilité de l'ouvrage.

**Exutoire** (de dévalaison) : ouverture aménagée dans un ouvrage ou un plan de grille, autorisant le passage des poissons vers l'aval.

**Goulotte** (de dévalaison) : canal collectant l'eau et les poissons à l'aval immédiat des exutoires de dévalaison associés à un plan de grille.

**Hauteur de chute nette** : la hauteur de chute nette correspond à la différence d'altitude entre les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval des turbines en fonctionnement. Elle diffère de la hauteur brute qui, à l'inverse, est mesurée lorsque les turbines sont à l'arrêt.

**Ichtyocompatible** : se dit d'un équipement ou d'un aménagement dont la conception limite fortement les impacts sur les poissons.

**Manteau** : partie fixe d'une turbine, à l'intérieur de laquelle tournent les parties mobiles.

**Montaison** : migration des poissons (ici les jeunes stades d'anguille, civelles et anguillettes) vers l'amont des bassins versants.

**Moyeu** : partie centrale de la turbine, que traverse l'essieu, l'axe de rotation.

**Opercule** : plaque osseuse qui recouvre les ouïes de certains poissons.

**Pale** : partie d'une turbine Kaplan sur laquelle s'exerce l'action du fluide moteur.

**Perte de charge** : en hydraulique, énergie dissipée par le frottement du liquide (par exemple ici, lors du passage du flux au travers d'une grille de prise d'eau).

**Plan de grille** : grille située en amont des turbines, permettant dans un premier temps d'empêcher les débris de taille importante de transiter par les turbines et dans un second temps, si l'espacement entre les barreaux est suffisamment faible, d'arrêter les poissons et de les guider vers un éventuel exutoire.

**Quartile** : chacune des trois valeurs qui divisent les éléments d'une distribution statistique en quatre parties d'effectif égal (ou, par extension, chacune de ces quatre parties).

**Ravalés** : qualifie les individus (de saumon) qui dévalent le cours d'eau suite à la reproduction.

**Recrutement** : abondance d'individus atteignant une classe d'âge, un stade de développement ou une taille donnée.

**Régime** (d'un cours d'eau) : ensemble des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau et leur mode de variation au cours du temps.

**Seuil** : ouvrage fixe ou mobile, souvent déversant, qui barre tout ou partie du lit mineur d'un cours d'eau.

**Smolt** : stade juvénile des poissons de la famille des Salmonidés, qui correspond au stade migrant depuis les eaux douces vers le milieu marin.

**Station hydrométrique** : dispositif mis en place sur un cours d'eau permettant d'en évaluer le débit en continu et d'enregistrer les valeurs obtenues.

**Turbine** : dispositif rotatif, destiné à utiliser la force d'un fluide pour produire de l'énergie mécanique. Cette énergie est fournie à un alternateur qui produit de l'électricité.

**Vitesse normale** : composante de la vitesse de l'écoulement perpendiculaire au plan de grille.

**Vitesse tangentielle** : composante de la vitesse de l'écoulement remontant vers le haut du plan de grille pour les plans de grilles inclinés et dans le sens de l'orientation pour les plans de grille orientés. Ce courant permet de guider les poissons vers les éventuels exutoires.

## Introduction

Dans un contexte écologique de perte générale de biodiversité en milieu aquatique, les poissons migrateurs **amphihalins**<sup>1</sup> subissent une régression singulièrement importante de leurs populations, notamment en Atlantique Nord (Limburg et Waldman, 2009). La situation est particulièrement préoccupante pour l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), qui connaît un déclin majeur depuis les années 1980 (ICES, 2007). Cette espèce est désormais classée en danger critique d'extinction par l'UICN<sup>2</sup> (Pike *et al.*, 2020).

Malgré les mesures de reconstitution du stock instituées par un règlement européen de 2007 (n°1100/2007), la population d'anguilles européennes ne s'est pas rétablie ; le **recrutement** annuel d'**anguilles jaunes** dans les eaux européennes en 2018 était de 29% du niveau moyen estimé entre 1960 et 1979 (ICES, 2019). Ainsi, dans le cadre d'un principe de précaution appliqué à l'anguille européenne, le conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM, ou ICES en anglais) recommandait en 2019 que tous les impacts anthropiques (pêche récréative et commerciale sur tous les stades de développement, hydroélectricité, stations de pompage et pollution) diminuant le recrutement et l'**échappement** des **anguilles argentées** soient nuls ou le plus proche possible de zéro en 2020 (ICES, 2019).

Du fait de leur cycle biologique particulier, les anguilles européennes appartiennent à une même population, qui doit être gérée de manière homogène et coordonnée dans les différents pays qui l'accueillent. Il convient pour cela d'optimiser la coopération entre les acteurs concernés par cette espèce (pêcheurs, hydroélectriciens, gestionnaires, scientifiques, collectivités, services et opérateurs nationaux...) à différentes échelles (locale, régionale, nationale) et dans les différents pays de son aire de répartition. Dans ce contexte, les principaux objectifs du programme Interreg Sudoe "SUDOANG", qui concerne l'Espagne, le Portugal et le sud-ouest de la France, sont de partager les connaissances, les meilleurs outils de diagnostic et de faciliter, entre ces trois pays, les actions de coopération visant à rétablir la population d'anguille européenne.

Le déclin de cette espèce peut être attribué à de nombreux facteurs liés aux activités humaines : pêche, altération des habitats et de la continuité écologique, qualité de l'eau... Parmi ceux-ci, la fragmentation des habitats joue un rôle primordial (Feunteun, 2002). En effet, pour pouvoir boucler son cycle vital, un individu doit traverser une première fois l'océan atlantique sous sa forme larvaire, s'approcher puis pénétrer (plus ou moins vers l'amont) dans le réseau hydrographique continental pour y grandir pendant plusieurs années, puis repartir en direction de l'océan pour le traverser une seconde fois avant de se reproduire. Lors de ce cycle, le bon déroulement des phases de migration dans les cours d'eau (**montaison**, puis **dévalaison**) est donc primordial. Pendant ces déplacements, les anguilles peuvent rencontrer un grand nombre d'ouvrages hydrauliques (**seuils**, **barrages**, prises d'eau...), qui entravent alors plus ou moins fortement leur progression, en provoquant potentiellement des retards ou des blocages (dans les 2 sens de migration), voire des mortalités d'individus (Trancart *et al.*, 2020). Ces mortalités peuvent s'observer principalement i) lors de la montaison, lorsque les jeunes stades (**civelles**, anguillettes) s'accumulent à l'aval des obstacles et deviennent des proies plus faciles pour d'autres espèces (ou pour les braconniers) et ii) lors de la dévalaison, lorsque les individus plus âgés sont

---

<sup>1</sup> Les mots écrits en vert sont définis dans le glossaire, en début de document.

<sup>2</sup> Union Internationale pour la Conservation de la Nature.

entraînés dans les prises d'eau des centrales hydroélectriques puis passent au travers des **turbines** en fonctionnement, mais également lorsqu'ils se retrouvent piégés dans les prises d'eau de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires, ou les prises d'eau pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable.

Depuis une vingtaine d'années, la France a développé une méthode d'estimation des taux de mortalité des anguilles dévalant au droit d'une centrale hydroélectrique. Cette méthode a notamment permis, préalablement à la mise en œuvre de mesures d'atténuation des impacts des installations hydroélectriques, une estimation des dommages causés aux anguilles à l'échelle de certains aménagements et certains axes de migration. C'est cette méthode, qui s'appuie sur la connaissance i) de l'activité migratoire, ii) de la répartition des poissons entre les différentes voies de passage au droit des ouvrages, iii) de l'efficacité des systèmes de dévalaison éventuellement présents et iv) des dommages subis par les poissons lors de leur passage au travers des ouvrages **évacuateurs de crues** et des turbines, qui est décrite dans ce document. Couplée aux estimations du nombre d'anguilles dévalantes et de leur structure en taille (issues du modèle EDA, voir les livrables du GT4 de SUDOANG), cette méthode peut permettre *in fine* d'estimer les quantités d'anguilles impactées par les ouvrages.

La formalisation de cette méthode, présentée ici, permettra à tous les acteurs concernés par la sauvegarde de l'anguille de produire un diagnostic de mortalité à l'échelle d'un aménagement hydroélectrique, voire à l'échelle d'un axe de migration s'il a en sa possession l'ensemble des données nécessaires aux différents calculs.

*N.B. : cette méthode peut s'appliquer à toute autre espèce sous réserve que les données nécessaires soient disponibles. En France par exemple, une démarche similaire est appliquée pour estimer la mortalité des **smolts** de saumon atlantique (*Salmo salar*).*

Ce document se décline en 4 parties :

- La première partie expose les différents types de turbines qu'un poisson peut rencontrer, pourquoi celles-ci peuvent induire des mortalités et quelles peuvent être les solutions pour les limiter ;
- la deuxième partie présente l'approche méthodologique développée dans la suite du document ;
- la troisième partie présente les données nécessaires aux différents calculs ;
- la quatrième partie déroule la méthode en elle-même et expose la manière de combiner les données nécessaires afin d'aboutir au diagnostic voulu. Un exemple concret est présenté.

## 1. Mortalités induites par les turbines et solutions pour les réduire

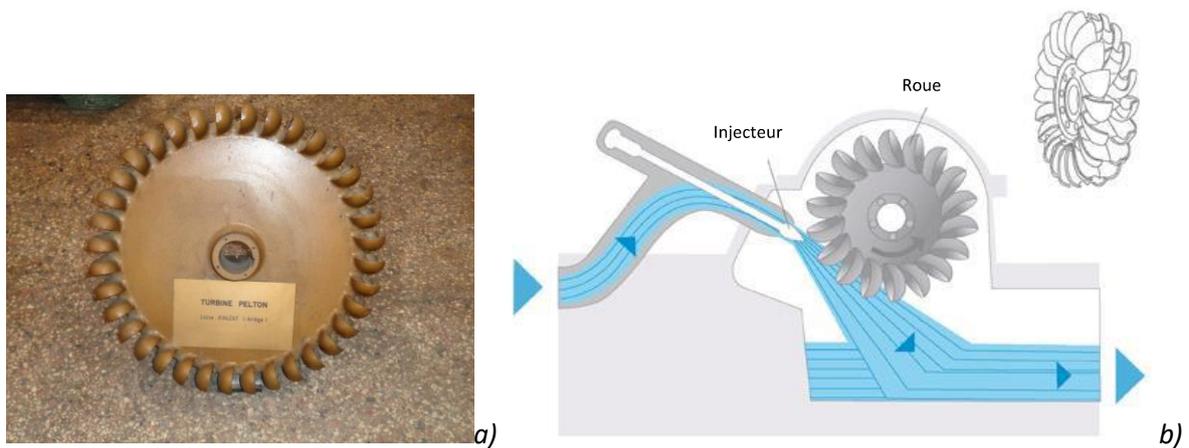
La mortalité des poissons lors de leur passage par les turbines peut être induite par différents phénomènes :

- **des chocs et abrasions** : des contacts directs avec les parties fixes ou mobiles de la turbine provoquent des blessures extérieures (contusions, lacérations, fractures de la colonne vertébrale, entailles pouvant aller jusqu'au sectionnement du corps) et/ou intérieures (hémorragies, lésions de divers organes) (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Larinier et Travade, 2002).
- **le coincement dans les interstices entre les parties fixes et mobiles de la roue** : si l'espace entre les parties mobiles et le **manteau** ou le **moyeu** est suffisamment important pour permettre aux poissons de s'y engager, mais inférieur à leur largeur de corps, ceux-ci sont susceptibles de se coincer et de se faire écraser ou sectionner (Odeh, 1999).
- **des variations de pression** : la pression à l'entrée des turbines est très supérieure à la pression de sortie. Cette brusque diminution de pression peut être à l'origine de lésions externes et internes (éclatement des yeux, de la vessie natatoire, hémorragies diverses...) (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Odeh, 1999 ; Cada, 2001).
- **des forces de cisaillement** : le phénomène de cisaillement se produit suite au déplacement de deux masses d'eau contiguës à des vitesses très différentes. Dans le sillage de la roue, ce phénomène est important et il est source de blessures pour les grands poissons (notamment les anguilles dévalantes), pour lesquelles différentes parties du corps peuvent être exposées à des vitesses d'écoulement très hétérogènes. Cela se traduit par des **opercules** retournés ou arrachés, des **arcs branchiaux** brisés, voire une décapitation (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Cada, 2001).

En fonction de leur configuration, de leur taille et de leur vitesse de rotation, différentes turbines engendreront des contraintes différentes au passage des poissons, et donc des probabilités de mortalité différentes.

### 1.1. Les différents types de turbines

Les trois types de turbines les plus utilisées en France sont les turbines Kaplan, Francis et Pelton.

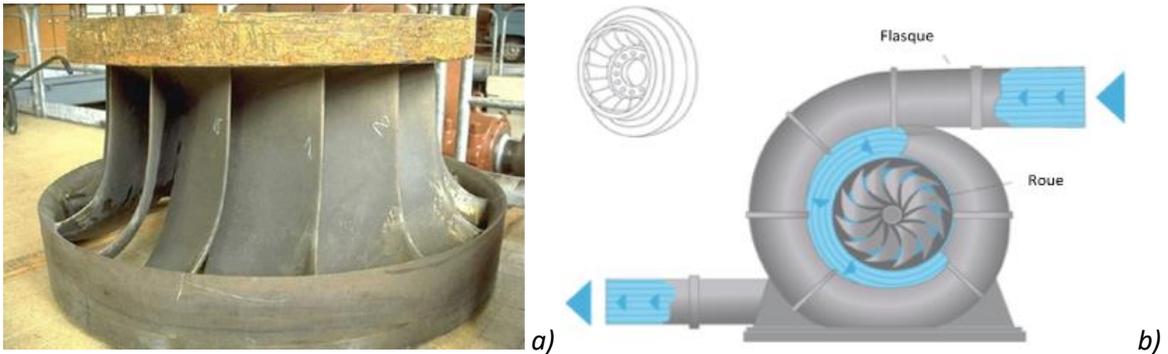


**Figure 1.** a) Turbine de type Pelton (photo P. Sagnes – OFB) ; b) principe de fonctionnement (www.landeskraftwerke.bayern).

La roue des **turbines Pelton** (Figure 1) est mise en mouvement grâce à un jet d'eau à très haute vitesse. L'eau est acheminée jusqu'aux turbines par des conduites forcées, qui permettent d'obtenir une importante pression au niveau de l'injecteur. Le jet provenant de l'injecteur induit un taux de mortalité de 100% pour toutes les espèces de poissons, car la vitesse et la pression de l'eau sont trop importantes et l'orifice de l'injecteur trop étroit pour permettre leur survie. Les anguilles sont toutefois peu concernées par des mortalités dues à ce type de turbines, car ces dernières équipent les hautes chutes de montagne (> 50 m), dans des zones où l'anguille est généralement absente.

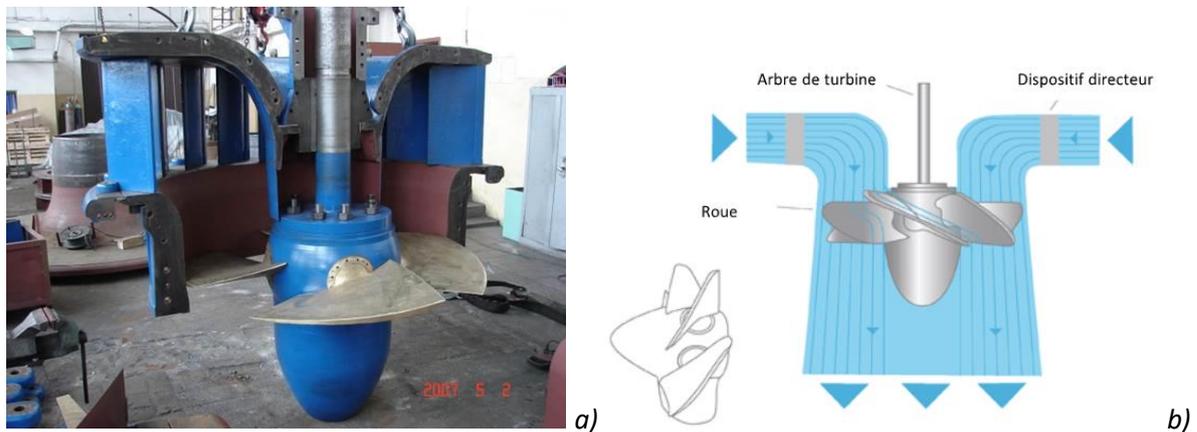
Les **turbines Francis** (Figure 2) sont constituées de 7 à 19 **aubes** fixées à un arbre central et à deux surfaces de révolution, le plafond et la ceinture. L'entrée de l'eau est périphérique et sa sortie est axiale. Ces turbines sont généralement installées sur des chutes hautes à moyennes (> 20 m) et peuvent être alimentées par des débits allant de quelques centaines de L/s à plus de 200 m<sup>3</sup>/s. Toutefois, historiquement, des turbines Francis ont été installées sur des basses chutes en France (au début du 20<sup>ème</sup> siècle) et peuvent donc concerner l'anguille. Le débit turbiné peut être modulé en réglant l'ouverture des directrices.

Les turbines Francis induisent des mortalités généralement importantes dans des conditions de chute hautes à moyennes, à cause des fortes vitesses de rotation associées. La mortalité des anguilles dans ce type de turbines est cependant inversement proportionnelle à la taille de la roue, car plus la roue est grande, plus l'espacement entre les aubes est large et laisse une chance aux poissons de passer sans subir de chocs importants.



**Figure 2.** a) Turbine de type Francis (photo M. Larinier – Onema) ; b) principe de fonctionnement (www.landeskraftwerke.bayern).

Dans le cas des **turbines Kaplan** (Cada, 2001) (Figure 3), la roue comporte 3 à 8 **pales**, fixées à un moyeu central, sans ceinture externe.



**Figure 3.** a) Turbine de type Kaplan en coupe (photo D. Courret – OFB) ; b) principe de fonctionnement (www.landeskraftwerke.bayern).

L'utilisation des turbines Kaplan est réservée aux usines de basses chutes, inférieures à 30 m. Ces turbines peuvent être utilisées pour des gammes étendues de **débits d'équipement** (pouvant dépasser 600 m<sup>3</sup>/s pour les plus grosses turbines). Le débit turbiné peut être modulé en réglant l'orientation des pales (turbine Kaplan dite "simple réglage") et éventuellement aussi en réglant l'ouverture des directrices (turbine Kaplan dite "double réglage"). Lorsque les pales sont fixes (débit turbiné non modulable), on parle de turbine "hélice" (ou "*propeller*" en anglais).

Pour une turbine Kaplan donnée, dont la vitesse de rotation est constante, les mortalités varient en fonction de l'orientation des pales et du **débit turbiné**. En effet, plus le débit turbiné est faible, plus les pales se referment, augmentant de manière significative les mortalités dues aux chocs. La dévalaison des anguilles ayant lieu lors de périodes de forts débits, l'espace inter-pales des turbines Kaplan est généralement considéré comme maximum durant cette période ; ce sont donc les valeurs les plus faibles de mortalités estimées qui sont considérées.

## 1.2. Différentes solutions permettant de limiter la mortalité des anguilles durant la dévalaison

Il existe différentes solutions pour réduire la mortalité des poissons dans les turbines hydroélectriques.

### 1.2.1. Opérations de turbinage

#### 1.2.1.1. Arrêts ciblés de turbinage

Les arrêts ciblés de turbinage consistent à stopper les turbines d'une usine hydroélectrique durant un temps limité (pour limiter les pertes économiques) et bien défini (pendant la période de passage des poissons) afin de limiter au maximum les mortalités (voir par exemple l'approche proposée par Teichert *et al.*, 2020a). Toute la difficulté de la mise en œuvre de cette solution réside dans le fait de bien identifier la période globale de dévalaison de l'espèce considérée, puis de cibler efficacement les épisodes de dévalaison au sein de cette période. Au niveau d'un aménagement, cette solution ne peut donc s'adresser qu'à une, voire deux espèces cibles. Si le cortège piscicole est composé de nombreuses espèces que l'on souhaite protéger, cette solution n'est pas envisageable car elle entraînerait des arrêts trop fréquents, généralement incompatibles avec une exploitation à visée économique.

En France, cette solution est principalement utilisée pour protéger les anguilles argentées, lorsqu'aucune autre solution présentant de meilleurs gages d'efficacité n'est envisageable (comme par exemple la mise en place de grilles fines, qui seront détaillées plus loin). Afin de cibler des arrêts de turbinage pour l'anguille, il est indispensable de parvenir à prédire les épisodes de dévalaison précisément et suffisamment à l'avance, pour être en mesure d'arrêter les turbines au bon moment. Pour cela, dans le cadre du programme national français R&D "anguille" (Baran et Basilico, 2012), deux types d'expérimentations ont été réalisées :

- à l'aide de "biomoteurs" tel que MIGROMAT<sup>3</sup> (Adam, 2000), dont l'efficacité s'est avérée parfois limitée (15-20% d'efficacité : MacNamara et McCarthy, 2011), parfois meilleure (66-73% d'efficacité : Bruijs. *et al.*, 2003 ; voir aussi des résultats non publiés dans Schwevers & Adam, 2019). A noter que l'utilisation de bio-moteurs peut poser (1) des difficultés d'approvisionnement en anguille chaque année avant la période de dévalaison, avec le risque de rater les premiers épisodes, et (2) des problèmes de dégradation de l'état sanitaire des individus durant une stabulation prolongée.

- à l'aide de modèles prenant en compte les paramètres environnementaux susceptibles de déclencher le phénomène de dévalaison (débit, température, turbidité, météorologie, ...). Cette seconde méthode peut atteindre des efficacités supérieures à la précédente (ex : de l'ordre de 77% en moyenne sur 6 saisons de suivi au niveau de la centrale de Tuilières sur la Dordogne, mais avec une perte énergétique importante, voir De Oliveira *et al.*, 2015). Elle nécessite des données locales, lourdes à acquérir, qui permettent de mettre en relation la quantité d'anguilles dévalantes avec les paramètres environnementaux sélectionnés. A noter toutefois qu'une étude récente (Teichert *et al.*, 2020b) donne du crédit aux critères basés uniquement sur les évolutions de débits, et démontre une certaine

---

<sup>3</sup> Ce biomoteur consiste à mesurer l'activité de locomotion d'anguilles maintenues en captivité dans des bassins et à prévoir, par analyse du signal enregistré, les périodes de dévalaison naturelle imminente.

transférabilité des modèles prédictifs entre sites, lorsque ceux-ci présentent une hydrologie proche de l'hydrologie naturelle ; d'autre part, cette transférabilité est meilleure lorsqu'elle s'effectue entre bassins versants de tailles comparables.

### **1.2.1.2. Éviter les turbinages à faible débit pour les turbines Kaplan**

Pour les turbines Kaplan, comme cela a été décrit précédemment, la mortalité des poissons augmente lorsque le débit turbiné diminue, notamment à cause de la réduction de l'espace entre les pales lorsqu'elles se referment (Berg, 1986 ; Bruijs *et al.*, 2003).

Dans le cas de centrales équipées de multiples turbines et fortement équipées par rapport aux débits du cours d'eau, une solution pour diminuer la mortalité peut alors consister à ne faire fonctionner chaque turbine qu'à pleine puissance. Cependant, l'efficacité de cette solution est assez limitée (Kroll, 2015) car la mortalité des poissons reste souvent significative, même lorsque les pales sont à pleine ouverture (i.e. lorsque le débit turbiné est maximal).

Dans le cas de centrales faiblement équipées par rapport aux débits du cours d'eau, cette solution n'a pas d'intérêt, le turbinage étant déjà à pleine puissance durant les épisodes de dévalaison des anguilles.

### **1.2.2. Les turbines ichtyocompatibles**

Le développement de turbines "ichtyocompatibles", c'est-à-dire de turbines n'induisant pas ou très peu de dommages sur les poissons, est relativement récent et toujours en cours pour certaines. En France, une turbine est reconnue ichtyocompatible uniquement suite à des tests biologiques positifs : les blessures et mortalité doivent être nulles ou quasi-nulles sur des individus injectés dans la turbine et conservés jusqu'à 48, voire 96 heures post-expérimentation (Baran et Courret, 2013). En aucun cas l'ichtyocompatibilité n'est reconnue sur les seules caractéristiques techniques ou caractéristiques de fonctionnement de la turbine. En effet, même les machines développées spécifiquement dans cet objectif ne se sont pas forcément avérées satisfaisantes dans leur première version. En ce qui concerne les anguilles, les tests biologiques doivent être réalisés sur des individus dont la taille est supérieure à 60 cm, afin d'être représentatif des tailles des femelles dévalantes (les taux de mortalité pour les individus dévalants plus petit, souvent des mâles, ne pouvant être que plus faibles).

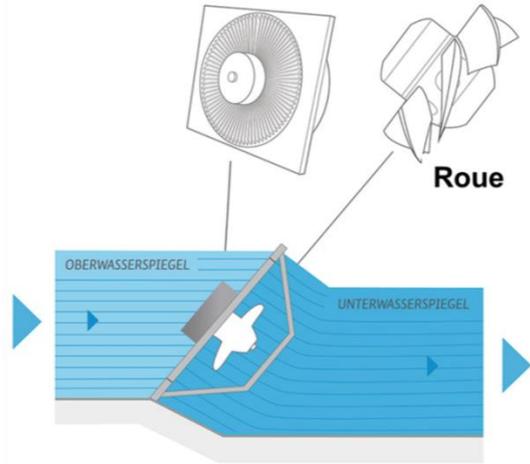
Deux types de turbines ichtyocompatibles sont reconnus aujourd'hui en France<sup>4</sup>. Il s'agit de la turbine ichtyophile© VLH (pour "very low head") (Figure 4) et les vis hydrodynamiques, sous réserve qu'elles respectent certaines précautions (Figure 5). Des tests plus poussés sont notamment attendus sur deux autres types de turbines, la turbine "Alden" et la turbine "FishFlow Innovations", dont les premiers résultats sont encourageants. D'autres types de turbines ichtyocompatibles sont en cours de développement.

---

<sup>4</sup> <https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/continuite-ecologique/turbines-ichtyocompatibles-140>



a)



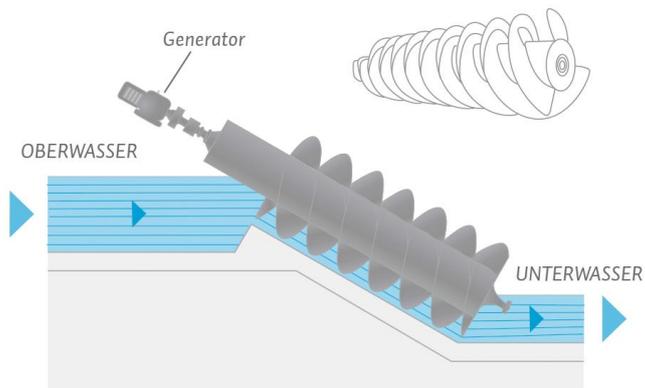
b)

**Figure 4.** a) Turbine ichtyophile© VLH (photo ECOGEA) ; b) principe de fonctionnement (www.landeskraftwerke.bayern).

Les turbines VLH ont été testées *in situ* et le taux de mortalité pour les anguilles (de tailles comprises entre 60 cm et 1m) s'est avéré inférieur à 1% (ECOGEA, 2011).



a)



b)

**Figure 5.** a) Turbine de type "vis hydrodynamique" (photo P. Sagnes - OFB) ; b) principe de fonctionnement (www.landeskraftwerke.bayern).

Les vis hydrodynamiques ont été testées en Allemagne (Späh, 2001), aux Pays-Bas (Merckx et Vriese, 2007) et en Angleterre (Fishtek, 2007, 2008, 2009). Les taux de survie sont très élevés voire totaux pour plusieurs espèces, notamment pour les anguilles, si certaines précautions sont respectées : interstice faible entre la vis et son manteau (idéalement < à 5 mm et dans tous les cas < à 10 mm), surface du manteau lisse, arrête amont recouverte d'un caoutchouc et non saillante à l'amont par rapport au manteau.

Ces deux types de turbines ichtyocompatibles sont cependant limitées aux ouvrages de basses à moyennes chutes (entre 1,4 et 2,8 m pour les VLH et entre 1 et 10 m pour les vis hydrodynamiques). La mise en place de ces turbines est généralement plus facile au niveau des nouveaux aménagements car, sur des centrales existantes, le changement de turbine peut induire des modifications importantes du génie civil.

### 1.2.3. Capture – transport des poissons

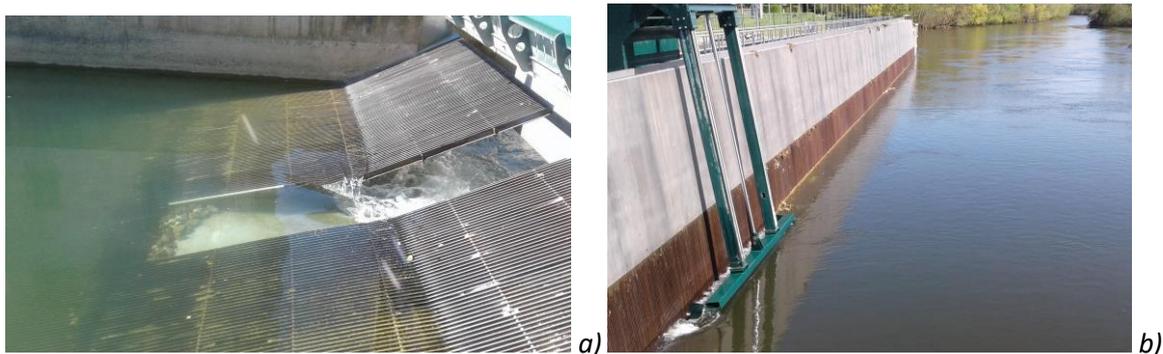
La solution consistant à capturer les poissons dévalants à l'amont d'un aménagement et à les transporter à l'aval n'est envisageable qu'à partir du moment où il est techniquement et financièrement possible d'installer un dispositif capable de capturer une fraction conséquente de la population dévalante (pêcherie, dispositif de piégeage), ce qui est très difficile pour les anguilles argentées compte tenu du fait qu'elles dévalent généralement à des périodes de forts débits.

Cette solution peut s'avérer intéressante lorsqu'elle permet d'éviter le passage par plusieurs aménagements en chaîne sur un cours d'eau. Plusieurs opérations de ce type sont en cours pour l'anguille. C'est le cas sur la rivière Shannon en Irlande depuis le début des années 2000 (McCarthy *et al.*, 2008 ; MacNamara & McCarthy, 2013) ainsi qu'en Suède sur plusieurs cours d'eau depuis 2010. Ainsi, entre 2015 et 2017, 47 000 anguilles argentées ont été capturées puis transportées en aval de plusieurs centrales hydroélectriques dans quatre cours d'eau suédois (Sandberg, 2018). Dans une étude réalisée au Royaume-Unis sur la rivière Stour, 86% des poissons capturés dans la retenue d'une centrale hydroélectrique et relâchés en aval ont rejoint la mer avec succès (Piper *et al.*, 2020). La conclusion de cette étude est que la capture et le transport des anguilles argentées est une méthode qui semble efficace, mais que les efforts de capture sont importants. Ce type de dispositif reste très rare car très difficile (souvent impossible) à mettre en œuvre de manière efficace.

### 1.2.4. Les barrières physiques : les grilles fines "ichtyocompatibles"

Les barrières comportementales (sons, lumières, bulles, électricité...) n'ont pas montré à ce jour de résultats satisfaisants quant à leur faculté d'arrêter des anguilles en dévalaison avant qu'elles ne pénètrent dans des turbines. Les seuls dispositifs permettant de stopper de manière efficace les anguilles sont des barrières physiques de types "grilles fines".

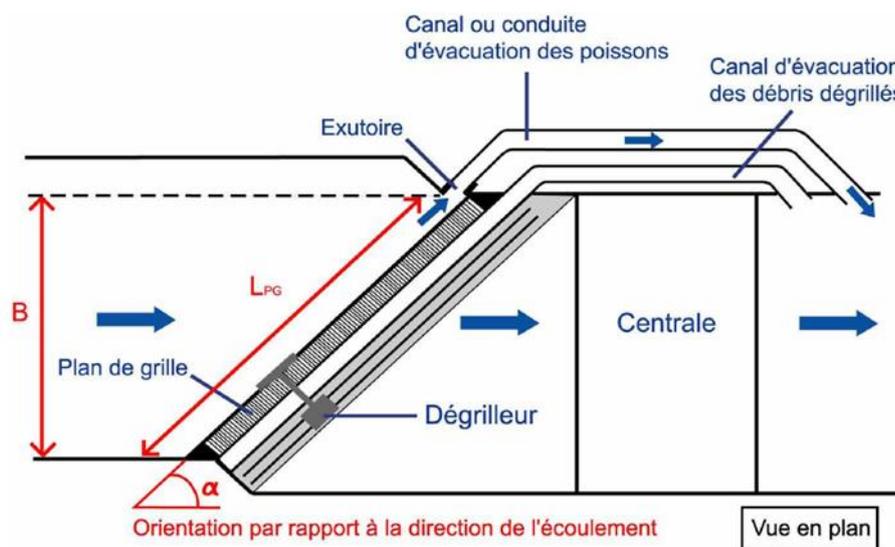
Les prises d'eau "ichtyocompatibles" (Figure 6) sont composées d'un **plan de grille** à faible espacement entre les barreaux, permettant non seulement d'arrêter les poissons, mais aussi de les guider vers un ou plusieurs **exutoires** débouchant dans une **goulotte** qui les achemine sans dommage jusqu'à l'aval de la centrale (Courret et Larinier, 2008). La superficie du plan de grille, son inclinaison ou orientation, et l'écartement entre les barreaux doivent être précisément dimensionnés, ce qui permettra non seulement de limiter les passages des individus par les turbines mais aussi de diminuer leur temps de franchissement de l'obstacle.



**Figure 6.** Prises d'eau ichtyocompatibles. a) Plan de grille incliné ; b) Plan de grille orienté (photos P. Sagnes - OFB).

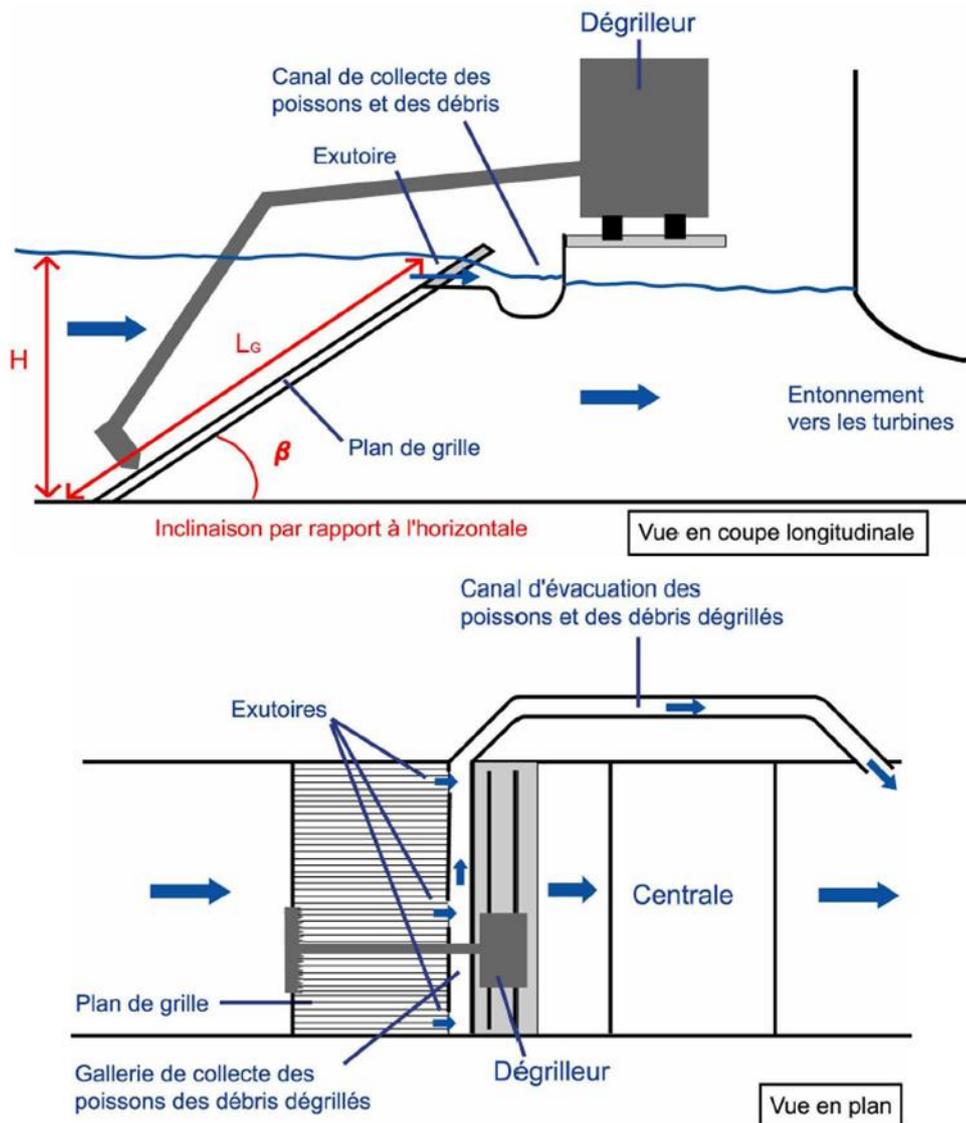
Leur installation impose cependant certaines contraintes (Courret et Larinier, 2008) sur les dimensions des prises d'eau pour respecter les critères d'efficacité biologique (vitesses d'approche et au niveau du plan de grille, guidage des poissons vers les exutoires...) et sur l'entretien (dégrillage), la quantité de corps dérivant arrêtés par la grille étant accrue par rapport à un plan de grille conventionnel.

Deux configurations de prises d'eau "ichtyocompatibles" sont envisageables (Courret et Larinier, 2008) :  
 - Soit un plan de grille quasi-vertical et orienté en plan d'un angle  $\alpha$  par rapport à la direction de l'écoulement (Figure 7) ; l'exutoire est alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille. Lorsque la longueur du plan de grille est importante, des exutoires intermédiaires peuvent être installés.



**Figure 7.** Plan de grille orienté, vue en plan. D'après Courret & Larinier (2008).

- Soit un plan de grille incliné (Figure 8) d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à l'écoulement ; le ou les exutoire(s) (selon la largeur de la prise d'eau) sont généralement positionnés au sommet du plan de grille.



**Figure 8.** Plan de grille incliné. Haut : vue latérale ; bas : vue en plan. D'après Courret & Larinier (2008).

Les barreaux sont le plus souvent verticaux et perpendiculaires au plan de grille, mais ils peuvent aussi être horizontaux dans le cas des plans de grille orientés. C'est le cas pour certaines prises d'eau en Allemagne, en Suède, en Autriche, en France et en Suisse (Ebel, 2013 ; Calles, 2016).

Certains plans de grille orientés sont placés dans le prolongement de la berge. Ce type d'installation permet de guider les poissons vers l'extrémité aval de la grille, mais nécessite toutefois d'étudier la courantologie sur chaque site en vue de guider efficacement les poissons et de limiter les risques de placage des individus sur la grille.

## 2. Approche méthodologique proposée dans ce guide

L'estimation d'un taux de mortalité global d'anguilles argentées dévalantes au niveau d'un aménagement hydroélectrique nécessite de connaître leur structure en classes de tailles et résulte de la somme de différentes estimations de mortalités, à mener en fonction des voies de passage des poissons. L'approche proposée se divise en **5 étapes** (Figure 9) :

**Étape 1** : la connaissance de la période globale de dévalaison et, au sein de cette période, des conditions de débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement permettront d'estimer la proportion de poissons franchissant l'aménagement par les ouvrages évacuateurs de crues (seuils, vannes, clapets, ...) et la proportion de poissons qui sera entraînée vers la prise d'eau de l'aménagement hydroélectrique. À noter que la connaissance des débits peut aussi être utile pour définir les conditions de turbinage de l'usine.

**Étape 2** : il convient ensuite d'estimer si une mortalité est possible au niveau des ouvrages évacuateurs de crues (seuils, vannes, clapets, ...).

**Étape 3** : pour les poissons qui se sont engagés en direction de l'usine, il convient d'estimer la proportion qui va passer au travers des turbines et la proportion qui va emprunter une voie de passage sécurisée (par exemple un exutoire de dévalaison associé à un plan de grille).

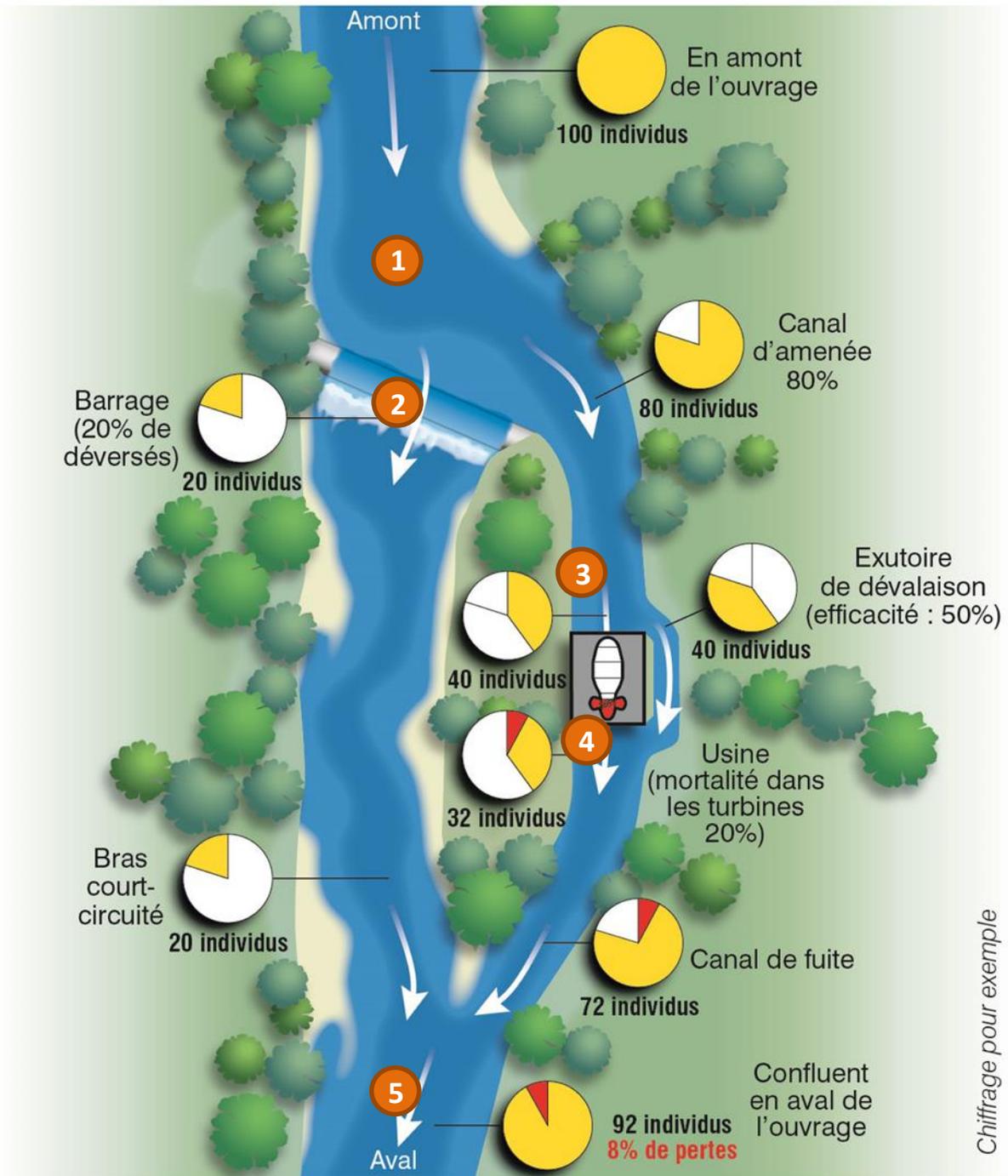
*N.B. : lors de l'étape 3, seule l'efficacité des plans de grilles fines sera décrite dans ce guide. En effet, les retours d'expérience sont trop peu nombreux vis-à-vis des autres solutions pour pouvoir donner des règles permettant d'en estimer l'efficacité. Le cas échéant, il pourra donc être fait appel à un avis d'expert pour estimer cette efficacité.*

**Étape 4** : pour les poissons qui sont passés dans une turbine, il convient d'estimer le taux de mortalité.

**Étape 5** : pour estimer la mortalité totale, il s'agit enfin d'additionner les mortalités induites par l'ensemble des voies de passage.

Les différentes étapes, représentées dans la Figure 9 par un numéro, sont détaillées dans les chapitres suivants, qui présentent successivement :

- les données nécessaires à acquérir ou centraliser (termes **en gras**, Chapitre 3) ;
- les différentes méthodes de calcul permettant d'arriver à une estimation de mortalité (Chapitre 4).



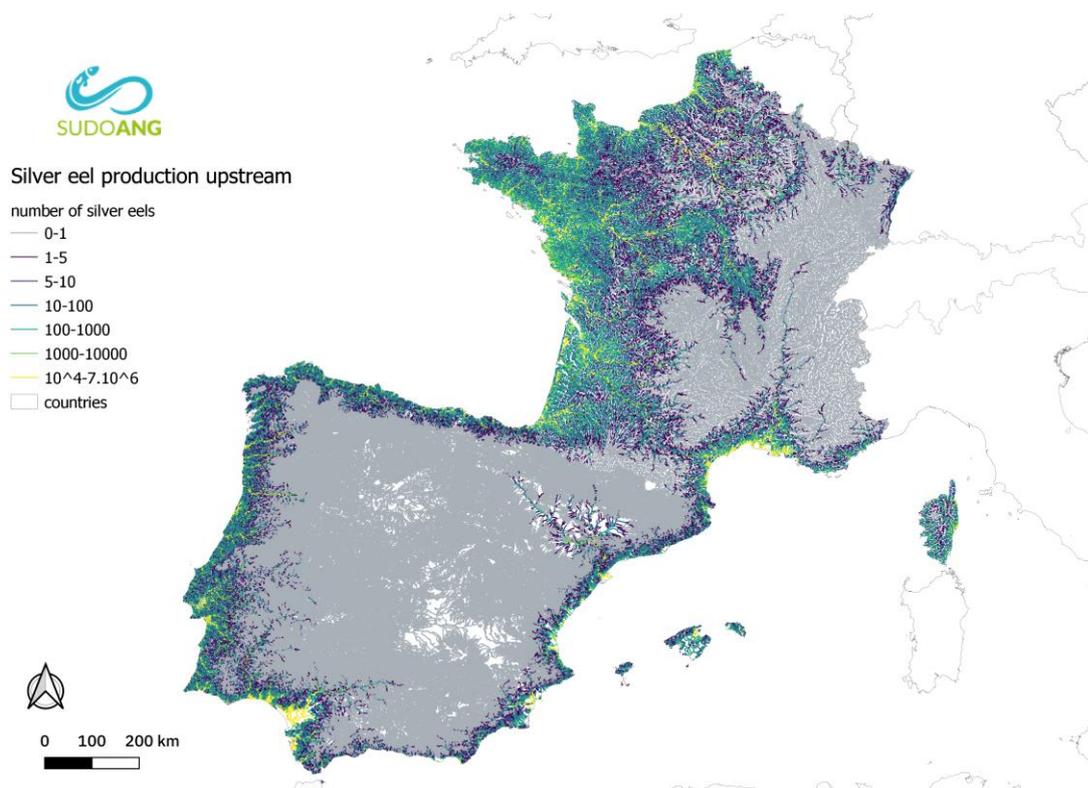
**Figure 9.** Cinq étapes permettant d'estimer un taux de mortalité pour des anguilles dévalantes au niveau d'un aménagement hydroélectrique. En jaune : proportion d'individus vivants ; en rouge : proportion d'individus morts. D'après Baudoin et al. (2014).

### 3. Données nécessaires pour établir un diagnostic de mortalité pour des anguilles dévalantes au niveau d'un aménagement hydroélectrique

Les paramètres présentés **en gras** dans ce chapitre représentent les types de données à acquérir ou à centraliser pour effectuer le diagnostic. Ils sont récapitulés en fin de chapitre 3, dans le Tableau 1.

#### 3.1. Évaluation du nombre d'individus se présentant au droit de l'aménagement et de leur taille

La méthode présentée dans ce guide permet d'évaluer un taux de mortalité relatif (en pourcentage) d'anguilles dévalantes au droit des ouvrages hydroélectriques. Si le **nombre d'anguilles dévalantes** au droit de l'aménagement est connu, il est alors possible d'estimer une quantité d'anguilles impactées. Un modèle de prédiction du nombre d'anguilles argentées produites à un niveau donné d'un **bassin versant** et leur structure en tailles (Eel Density Analysis, EDA, version 2.3) a été développé pour la France, l'Espagne et le Portugal dans le cadre de SUDOANG (GT4 – Échappement, exemple en Figure 10), à partir notamment de données d'échantillonnage par pêches électriques. Ce modèle permet par exemple d'estimer l'échappement historique et actuel des anguilles argentées (Briand *et al.*, 2018).



**Figure 10.** Exemple d'estimation du nombre d'anguilles argentées produites dans les cours d'eau français, espagnols et portugais. D'après le modèle EDA 2.3, développé dans le cadre de GT4 de SUDOANG (résultats provisoires, modèle en cours de développement).

**La taille des individus dévalants** peut varier d'environ 25 cm à plus de 1 m. Il est important de savoir quelles sont les classes de tailles présentes en amont de la centrale hydroélectrique étudiée, ainsi que leurs proportions. La taille des anguilles en amont d'un aménagement peut être liée à son emplacement sur le bassin versant. Les femelles sont plus grandes que les mâles (de 40 à plus de 90 cm contre 25 à 50 cm, respectivement) (Holzner, 1999 ; Acou, 1999 ; Gosset *et al.*, 2002 ; DWA, 2005 ; données recueillies dans le cadre du GT 1 de SUDOANG) et colonisent généralement des zones plus à l'amont des bassins versants (Lasne *et al.*, 2008). Une centrale hydroélectrique située en amont d'un bassin est donc susceptible d'impacter surtout des anguilles de taille importante (principalement des femelles), alors qu'une centrale située en aval impactera potentiellement des poissons de tailles variées (dont les femelles issues de l'amont).

Il n'est pas toujours facile d'obtenir des informations relatives à la taille précise des individus sans campagnes d'échantillonnage potentiellement lourdes. Pour cela, on s'appuiera sur les connaissances à disposition :

- des données locales de pêche, qui renseignent sur la présence potentielle d'anguilles et sur la taille des individus capturés ;
- des études réalisées sur des bassins versants proches, avec des ouvrages présentant une distance à la mer comparable ;
- certains résultats du GT4 de SUDOANG, permettant de modéliser la structure en tailles des anguilles dévalantes à partir de la structure en tailles prédite pour des anguilles jaunes et du sexe ratio.

## 3.2. Proportion d'individus dévalant par les ouvrages évacuateurs de crue vs proportion d'individus entraînés dans la prise d'eau

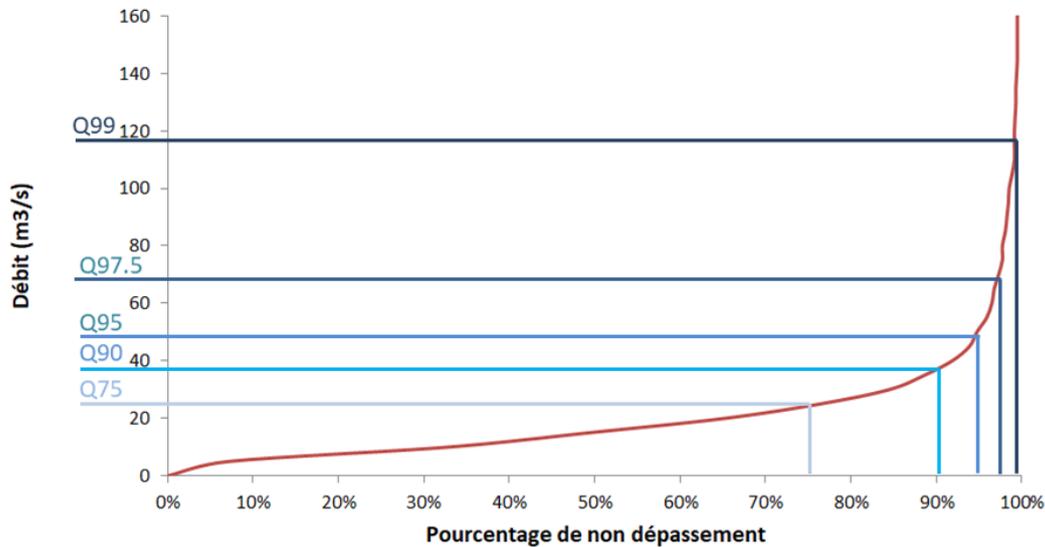
Ce paragraphe expose les données nécessaires pour répondre à l'étape **1** de la Figure 9.

### 3.2.1. Période de migration et débits correspondants

La **période de dévalaison des anguilles**, qui peut différer d'un site à un autre, est importante à connaître puisqu'elle permet de définir les **débits auxquels les poissons vont se présenter au niveau de l'aménagement**. Ces débits permettent de calculer les proportions de poissons empruntant les différentes voies vers l'aval.

Si les données de débit au droit de la centrale ou à sa proximité immédiate ne sont pas directement disponibles, il est important de les reconstituer au mieux à partir d'autres données existantes. On peut pour cela utiliser différentes méthodes, consistant soit à combiner linéairement des observations issues d'un ensemble de stations, soit à utiliser des rapports de surfaces de bassins versants, soit à avoir recours à des outils de modélisation (voir Lebecherel *et al.*, 2015). Nous proposons ici une méthode classique (voir Chapitre 4), utilisant des données issues de la **station hydrométrique** la plus proche possible (à l'amont ou à l'aval) de l'aménagement concerné. En France, ces données sont disponibles sur la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/indexd.php>).

Une fois ces données récupérées ou estimées, les débits journaliers durant la période de migration vont permettre de réaliser des courbes de **débits classés**, permettant de déterminer les débits caractéristiques de l'hydrologie du cours d'eau (Figure 11). Ceux-ci correspondent à une fréquence de non dépassement (i.e. différents  $Q_x$  correspondant aux débits non dépassés X % du temps).

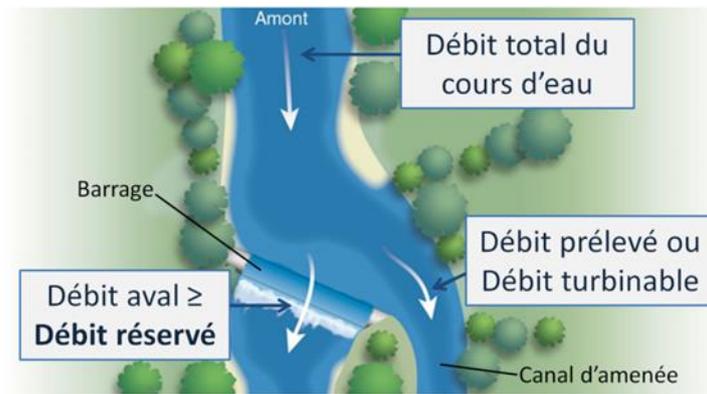


**Figure 11.** Exemple de courbe de débits classés (Gave d'Aspe, France, entre 2000 et 2011) durant la période de dévalaison des anguilles (ici d'octobre à janvier), permettant de définir les débits caractéristiques d'un cours d'eau sur une période donnée ( $Q_x$  = débit non dépassé x % du temps). Courbe établie lors de l'analyse des données du délivrable 2.2.2 de SUDOANG (en cours de rédaction).

L'importance et l'intérêt de ces débits caractéristiques, dans la démarche diagnostique préconisée par ce guide, sont exposés dans le Chapitre 4.

### 3.2.2. Débit réservé et débit d'équipement

Le **débit réservé** ( $m^3/s$ ) est le débit plancher qu'un gestionnaire doit laisser dans un cours d'eau à l'aval immédiat d'un ouvrage de prélèvement ou de dérivation (Figure 12). Il s'agit donc du débit minimum qui doit transiter au niveau d'un seuil permettant l'alimentation en eau d'un canal d'amenée. Dans certains cas, s'ils sont rejetés en pied de seuil, les débits s'écoulant dans les exutoires de dévalaison et les dispositifs de franchissement piscicole peuvent participer au débit réservé.



**Figure 12.** Schéma représentant la répartition des débits au droit d'un seuil. D'après Baudoin et al. (2014).

Le **débit d'équipement** ( $m^3/s$ ) est le débit transitant par l'ensemble des turbines lors d'un fonctionnement de la centrale hydroélectrique à pleine puissance.

Rapportés au débit du cours d'eau lors de la période de dévalaison, ces deux débits interviennent dans le calcul des proportions d'individus dévalant au niveau des ouvrages évacuateurs de crue (seuil, vanne, clapet, ...) et de ceux entraînés dans la prise d'eau.

### 3.3. Taux de mortalité au niveau des ouvrages évacuateurs

Ce paragraphe expose les données nécessaires pour répondre à l'étape **2** de la Figure 9.

Si le passage des poissons dévalants au niveau des ouvrages évacuateurs est généralement considéré comme non traumatisant, il peut dans certains cas engendrer des blessures, voire des mortalités. Ces dommages sont difficiles à quantifier, mais certains critères permettent de définir, *a minima*, si cette voie de passage est sûre ou non :

- **la hauteur de chute** au seuil, représentée par la différence entre la cote amont et la cote aval dans les conditions de débits des épisodes de dévalaison ; les poissons peuvent être blessés si cette hauteur est trop importante du fait d'une vitesse à l'impact trop élevée ;
- **la hauteur d'eau dans la zone de réception** : les poissons peuvent être blessés lorsqu'ils arrivent à l'aval si le matelas d'eau n'est pas suffisant dans la zone de réception, du fait de chocs ou d'abrasion sur le fond ;
- **la présence ou non d'éléments "agressifs" au niveau de la fosse** (tel que des blocs dissipateurs) : les poissons peuvent être blessés si de tels éléments sont situés dans la zone de réception ;
- **le tirant d'eau et la rugosité sur la crête du seuil et le parement incliné** : si le tirant d'eau n'est pas suffisant et que des rugosités sont présentes, il y a un risque de blessures par chocs ou abrasion lors du passage de l'obstacle.

### 3.4. Efficacité du plan de grille

Ce paragraphe expose les données nécessaires pour répondre à l'étape **3** de la Figure 9.

*N.B. : Nous ne présenterons ici que les paramètres permettant d'évaluer l'efficacité d'un plan de grille proposé dans le cadre de la mise en place d'une prise d'eau ichtyocompatible. L'efficacité d'autres types de dispositifs éventuellement présents à l'amont des turbines, pour lesquels les retours d'expérience ne sont pas suffisants à ce jour, pourront faire l'objet d'un avis d'expert au cas par cas.*

Le rôle du plan de grille est d'arrêter les poissons puis de les guider vers un (ou des) exutoire(s) débouchant dans une goulotte, qui les achemine sans dommage jusqu'à l'aval de la centrale. Les paramètres permettant d'évaluer l'efficacité d'un plan de grille sont détaillés ci-dessous (d'après Courret et Larinier, 2008).

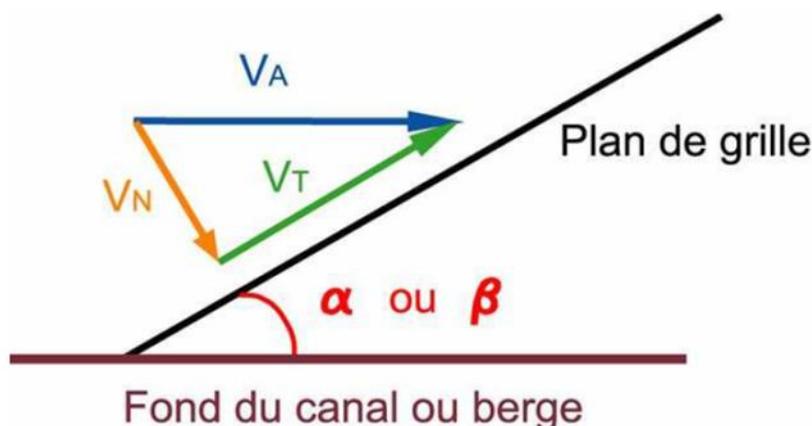
#### 3.4.1. Taille des individus présents en amont de la centrale hydroélectrique

Ce paramètre (décrit précédemment, voir paragraphe 3.1) est important puisque, pour rappel, plus les poissons sont petits, plus ils sont susceptibles de passer au travers d'un plan de grille donné. De plus, plus les poissons sont grands, plus leur taux de mortalité est élevé dans une turbine donnée.

#### 3.4.2. Vitesses d'écoulement à l'amont du plan de grille

La **vitesse normale** ( $V_N$ , Figure 13) au niveau du plan de grille correspond à la composante de la vitesse de l'écoulement qui arrive perpendiculairement au plan de grille. Si cette vitesse est trop importante, elle peut induire un placage des poissons sur la grille, suivi d'une mortalité.

La **vitesse tangentielle** ( $V_T$ , Figure 13) est la composante de la vitesse de l'écoulement dirigée vers les exutoires, soit vers le haut du plan de grille pour les plans de grilles inclinés, soit vers l'extrémité aval pour les plans de grille orientés. Plus cette vitesse est importante, plus les poissons vont être guidés efficacement vers le ou les exutoire(s).



**Figure 13.** Les différentes composantes de la vitesse d'écoulement à l'amont d'un plan de grille incliné.  $V_A$  : vitesse d'approche ;  $V_N$  : vitesse normale ;  $V_T$  : vitesse tangentielle. D'après Courret & Larinier (2008).

### 3.4.3. Caractéristiques du plan de grille

Plus l'**espacement entre les barreaux** est faible, plus le plan de grille est efficace pour arrêter les poissons les plus petits. Seule une barrière physique stricte, empêchant mécaniquement les individus de passer, semble en mesure d'arrêter efficacement les anguilles<sup>5</sup>. Le corps d'une anguille est très souple, mais elle peut être physiquement bloquée par une grille au niveau de sa tête, rigide et plus large que le reste du corps. C'est donc la largeur de la tête des anguilles qui sert de référence pour établir la valeur de l'espacement inter-barreaux efficace pour les arrêter.

L'**inclinaison ou l'orientation du plan de grille** ont également un impact sur son efficacité. Plus l'angle  $\beta$  (pour un plan de grille incliné) ou  $\alpha$  (pour un plan de grille orienté) est faible, plus les poissons sont guidés efficacement vers les exutoires, car la vitesse tangentielle est alors maximisée.

L'**aire immergée du plan de grille** permet de calculer la vitesse normale moyenne en fonction du débit turbiné, vitesse positivement corrélée avec le risque de placage des poissons sur la grille.

### 3.4.4. Caractéristiques des exutoires

La **présence d'exutoire(s)** est indispensable pour garantir l'échappement des individus arrêtés par un plan de grille. En effet, en l'absence de cet élément, les poissons peuvent soit :

- faire demi-tour et franchir l'aménagement au niveau des ouvrages évacuateurs (ils auront alors *a minima* été retardés pendant leur migration) ;
- être plaqués contre la grille suite à un épuisement, ce qui est synonyme de mortalité ;
- passer au travers du plan de grille et risquer d'être blessés ou tués par les turbines.

Il est également important de connaître le **nombre d'exutoires ainsi que leur emplacement**. En effet, un exutoire mal placé ou mal dimensionné peu compromettre l'efficacité d'un plan de grille.

Le **débit à l'entrée des exutoires** doit être suffisant par rapport au débit turbiné afin d'être attractif pour les poissons et d'assurer efficacement leur entrée dans la goulotte de dévalaison. Pour que ce débit soit suffisant, les **dimensions de l'entrée de l'exutoire** ne doivent pas être trop petites. De plus, les accélérations ou décélérations de l'écoulement doivent être limitées en entrée de l'exutoire afin d'éviter une certaine réticence des poissons à y pénétrer.

## 3.5. Éléments pour calculer le taux de mortalité au niveau des turbines

Ce paragraphe expose les données nécessaires pour répondre à l'étape **4** de la Figure 9.

### 3.5.1. Taille des individus présents en amont de la centrale hydroélectrique

La **taille des individus** intervient également dans cette étape du diagnostic, étant donné que les plus grands individus ont un taux de mortalité plus important que les petits lors de leur passage dans une

---

<sup>5</sup> Il existe aussi des grilles induisant une barrière comportementale, utilisées par exemple pour protéger les smolts de salmonidés, mais cet exemple n'est pas développé ici.

turbine donnée. En effet, les probabilités de choc avec les composantes mobiles, ainsi que les phénomènes de cisaillement, sont plus importants pour les plus grands individus.

### 3.5.2. Caractéristiques des turbines

**Le type de turbine** détermine en partie le taux de mortalité. Les formules permettant d'estimer les mortalités ne sont pas les mêmes en fonction du type de turbine. En ce qui concerne les turbines ichtyocompatibles, les paramètres cités ci-dessous ne sont pas utiles, puisque les taux de mortalités sont alors considérés comme nuls (ou quasi-nuls) pour l'anguille.

Pour des turbines de même type et de tailles comparables, plus **le nombre de pales ou d'aubes** est important, plus les mortalités estimées seront importantes du fait de l'augmentation de la probabilité de choc entre les poissons et ces parties mobiles.

De même, plus **la vitesse de rotation de la roue** est importante, plus le risque de choc des poissons contre une partie mobile de la turbine est fort.

En revanche, plus le **diamètre de la turbine** est important, plus la mortalité estimée est faible, car l'augmentation de l'espacement entre les aubes (ou les pales) en périphérie de la roue engendre une moindre mortalité. De plus, pour un même débit turbiné, une roue possédant un diamètre important aura une vitesse de rotation plus faible qu'une roue avec un diamètre inférieur, ce qui induira des mortalités plus faibles.

### 3.5.3. Débit d'équipement et débit turbiné par chaque turbine

Le **débit d'équipement** intervient dans le calcul des proportions d'individus dévalant par les ouvrages évacuateurs de crue (seuil, vanne, clapet, ...) et de ceux entraînés dans la prise d'eau. La valeur de **débit turbiné par chaque turbine** intervient dans les formules d'évaluations des taux de mortalités dans les turbines.

Dans le cas des centrales équipées de plusieurs turbines engendrant des taux de mortalité différents, il est nécessaire de connaître la **répartition du débit total entre les différentes turbines sur l'ensemble de la gamme de turbinage** pour en déduire le taux de mortalité moyen engendré par les turbines.

### 3.5.4. Hauteur de chute

La valeur de **hauteur de chute** intervient dans les formules d'évaluations des taux de mortalités dans les turbines. Pour des turbines de même type, globalement, plus la hauteur de chute est importante plus les vitesses de rotation sont élevées et plus les taux de mortalités observés sont forts.

## 3.6. Tableau récapitulatif des différentes informations à connaître

Les différents paramètres à bancariser (Tableau 1) seront dans un second temps (voir chapitre 4) intégrés dans des formules de calcul permettant de déterminer le taux de mortalité des anguilles argentées dévalantes au droit d'un aménagement hydroélectrique.

**Tableau 1.** Types de données à collecter pour estimer la mortalité des anguilles dévalant au droit d'une centrale hydroélectrique. Les données propres aux centrales et la manière de les bancariser sont présentées dans le livrable 1.1.1 de SUDOANG.

<b>Données biologiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Période de dévalaison</b> (afin de déterminer les débits à considérer)</li> <li>- <b>Taille des individus</b> présents en amont de l'ouvrage (cm), si possible connaître la répartition en <b>classes de tailles</b></li> <li>- <i>Éventuellement, nombre/densité d'anguilles dévalantes afin d'estimer des mortalités absolues (en nombre d'individus, biomasse, nombre d'œufs perdus...)</i></li> </ul>
<b>Données hydrologiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Débits du cours d'eau</b> pendant la période de dévalaison (<math>m^3/s</math>), si possible sur au moins une dizaine d'années</li> <li>- Le cas échéant, <b>débit réservé</b> (<math>m^3/s</math>)</li> <li>- <i>Éventuellement, toutes données utiles pour estimer les débits d'intérêt au droit de l'aménagement</i><sup>6</sup></li> </ul>
<b>Données concernant les aménagements hydroélectriques</b>
<b>Ouvrages évacuateurs de crues (seuil, vanne, clapet, ...)</b>
<p><b>Hauteur de chute</b> (m)</p> <p><b>Hauteur d'eau au pied du seuil</b> aux débits de dévalaison (m)</p> <p><b>Type de parement</b> (vertical ou incliné [°])</p> <p><b>Présence ou absence d'éléments agressifs</b> sous la chute ou sur le parement</p>
<b>Plan de grille et exutoire(s)</b>
<p><b>Aire immergée</b> du plan de grille (<math>m^2</math>)</p> <p><b>Inclinaison ou orientation</b> du plan de grille (°)</p> <p><b>Espacement libre entre les barreaux</b> du plan de grille (mm)</p> <p><b>Vitesse normale</b> au niveau du plan de grille (m/s)</p> <p><b>Vitesse tangentielle</b> au niveau du plan de grille (m/s)</p> <p><b>Présence d'exutoire(s)</b></p> <p><b>Nombre et emplacements</b> des exutoires</p> <p><b>Dimensions de l'entrée</b> du ou des exutoires (m)</p> <p><b>Débit à l'entrée de l'exutoire</b> (<math>m^3/s</math>) (à rapporter au débit turbiné)</p>
<b>Turbines</b>
<b>Débit d'équipement et turbiné par chaque turbine</b> ( $m^3/s$ )
<p><b>Répartition du débit total entre les différentes turbines sur l'ensemble de la gamme de turbinage</b></p> <p><b>Types et nombre de turbines</b> utilisées</p> <p><b>Diamètre</b> de la (des) roue(s) (m)</p> <p><b>Vitesse de rotation</b> de chaque turbine (tours/min)</p> <p><b>Hauteur de chute nette</b> (m)</p> <p><b>Nombre de pales ou d'aubes</b></p>

<sup>6</sup> Exemple : surface du bassin versant au niveau de l'ouvrage au regard de la surface du bassin versant au niveau de la station de mesure de débit utilisée, ce qui permet d'estimer un débit au niveau de l'ouvrage (voir la méthode de calcul au paragraphe 4.1.2).

## 4. Établissement du diagnostic, méthodes de calcul

### 4.1. Taux d'échappement au niveau des ouvrages évacuateurs de crue

Ce paragraphe expose la façon d'utiliser les données pour répondre à l'étape **1** de la Figure 9.

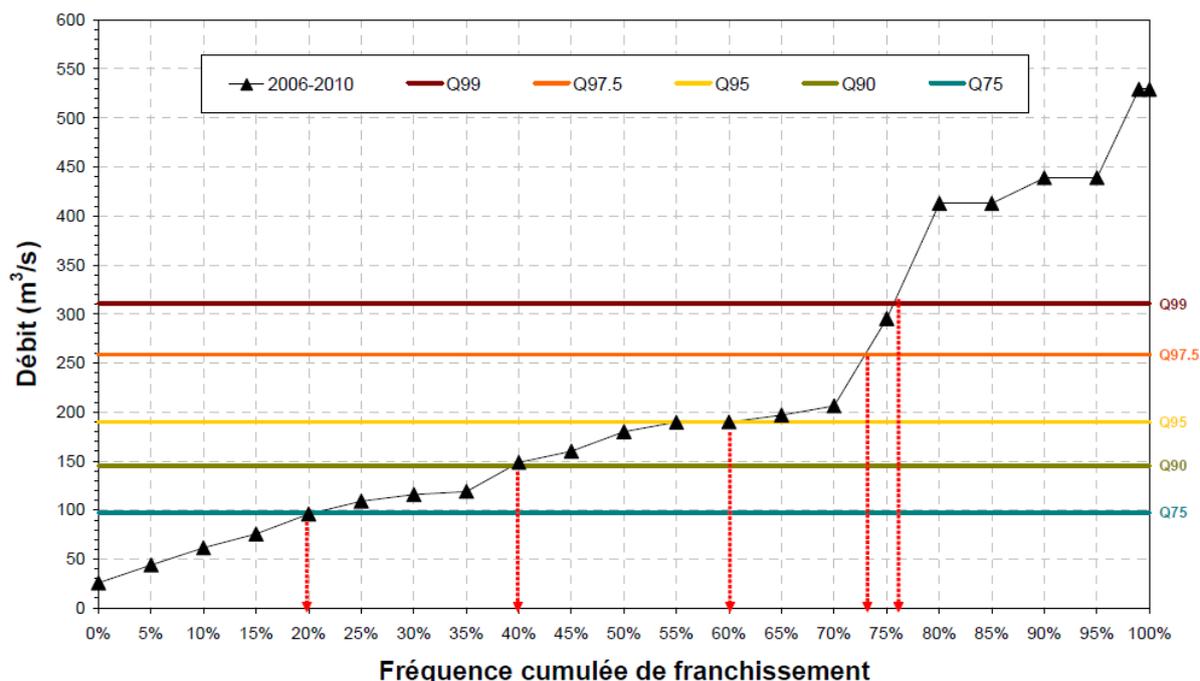
#### 4.1.1. Phase 1 : Période globale de dévalaison et débits déclenchant les épisodes de dévalaison

Des suivis réalisés sur des cours d'eau présentant des **régimes hydrologiques** différents ont montré que le déclenchement de la migration de dévalaison des anguilles argentées est fortement lié à des augmentations de débit et de turbidité de l'eau. Ceci a notamment été observé sur des campagnes de piégeage en France, sur la Nive à Halsou (Gosset *et al.*, 2000, 2001, 2002) ainsi que sur des campagnes de radiopistage sur le Gave de Pau aval (Subra *et al.*, 2005, 2006 ; Bau *et al.*, 2010, 2011, 2013 ; Travade *et al.*, 2009). En France, les connaissances actuelles révèlent que les périodes de dévalaison de l'anguille sont variables selon les années et les cours d'eau et qu'elles peuvent parfois être très longues. Une synthèse réalisée par Acou *et al.* (2009) conclut qu'à l'échelle européenne, si l'intensité migratoire des anguilles argentées est maximale pendant la deuxième moitié de l'année entre août et décembre, celle-ci est cependant observable toute l'année. Lors des diagnostics de mortalité réalisés au niveau des rivières du sud-ouest de la France, une période de dévalaison s'étendant d'octobre à fin janvier a été sélectionnée (ECOGEA, 2014). Il apparaît toutefois de plus en plus que la période de dévalaison puisse débuter entre août et octobre et s'étendre jusqu'au mois d'avril, voire juin, en particulier suite à des automnes secs, comme indiqué par les suivis réalisés en France :

- sur la rivière Dronne avec des dévalaisons observées globalement de fin octobre jusqu'à fin juin de 2011-2012 à 2014-2015 (Verdeyroux & Guerri, 2015) ;
- sur la Dordogne avec des dévalaisons observées d'octobre à mars (Comité Scientifique de Tuilières, 2016) ;
- sur la Bresle avec, en 2009, des dévalaisons observées essentiellement de début août à fin décembre, mais aussi un peu tous les mois de l'année (Euzenat *et al.*, 2011) ;
- ou encore sur l'Orne (FCPPMA14, 2014a) et la Touques (FCPPMA14, 2014b).

Les périodes de dévalaison des anguilles pouvant être différentes d'un cours d'eau à un autre, il semble **indispensable de se renseigner le mieux possible sur le contexte de l'axe étudié**, voire de réaliser des suivis si nécessaire, avant de pouvoir proposer une estimation de mortalité pertinente.

En ce qui concerne les **débits déclenchant les épisodes de dévalaison** au sein de cette période, les diagnostics de mortalité menés en France jusqu'à ce jour sont basés sur les résultats obtenus par Bau *et al.* (2013) (Figure 14). Dans cette étude, le traitement de 562 franchissements d'ouvrages sur le Gave de Pau a permis de définir globalement la proportion d'anguilles dévalant pour différentes valeurs caractéristiques de débits calculées **pendant la période de migration**.

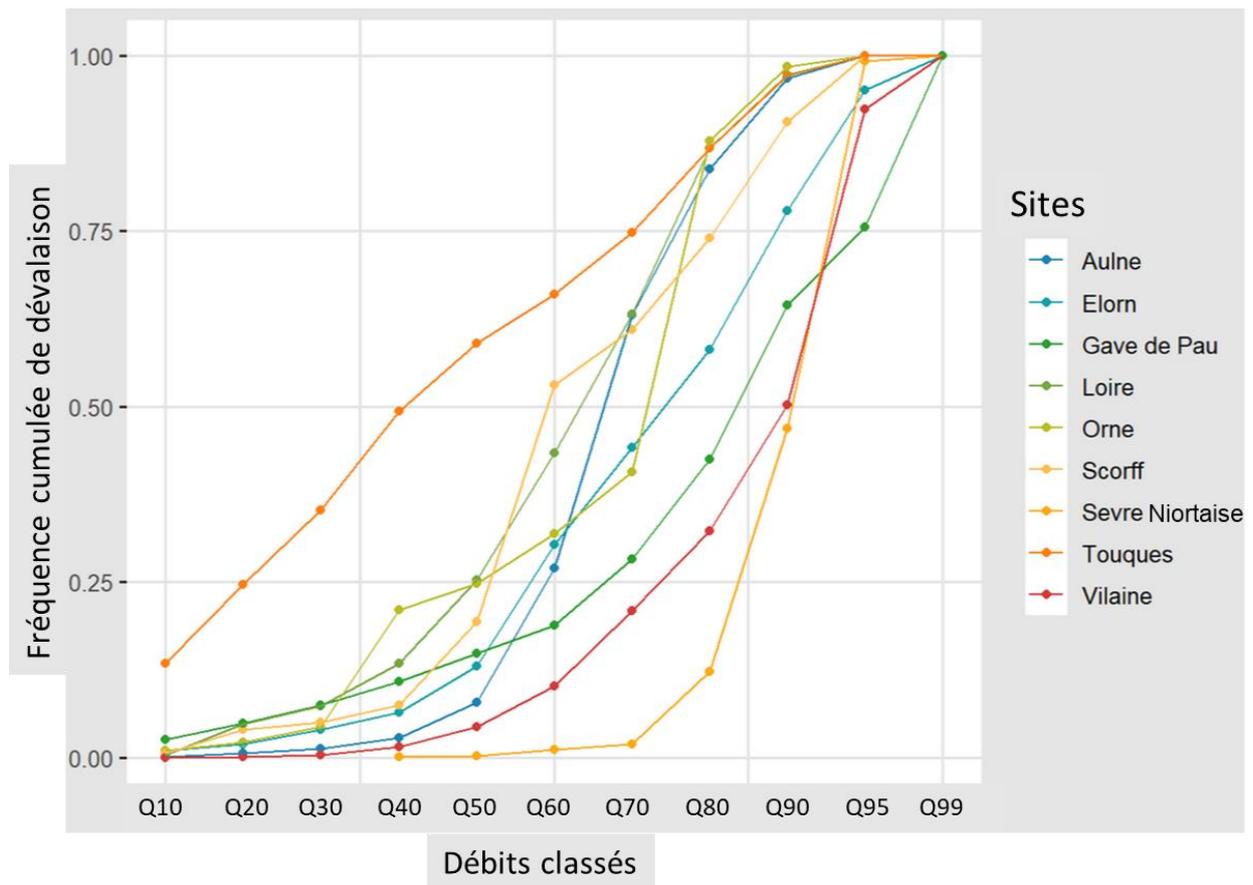


**Figure 14.** Débits caractéristiques des périodes de dévalaison des anguilles sur le Gave de Pau (entre 2006 et 2010) et passages cumulés des individus.  $Q_x$  = débit non dépassé pendant  $x\%$  du temps. D'après Bau et al. (2013).

Ces résultats, confortés sur un autre cours d'eau (la Dronne, cf. Drouineau *et al.*, 2017), pointent une quasi-équipartition des passages de poissons entre cinq **valeurs caractéristiques de débit** :

- 20% des poissons dévalent à un débit voisin du 3<sup>ème</sup> **quartile** des débits journaliers de la période de migration considérée (Q75),
- 20% des poissons dévalent à un débit voisin du 90<sup>ème</sup> **centile** des débits journaliers de la période de migration considérée (Q90),
- 20% des poissons dévalent à un débit voisin du 95<sup>ème</sup> centile des débits journaliers de la période de migration considérée (Q95),
- 20% des poissons dévalent à un débit voisin du 97.5<sup>ème</sup> centile des débits journaliers de la période de migration considérée (Q97.5),
- 20% des poissons dévalent à un débit voisin du 99<sup>ème</sup> centile des débits journaliers de la période de migration considérée (Q99).

Cependant, des données collectées très récemment dans le cadre du programme SUDOANG ont permis de montrer que les proportions d'anguilles dévalantes en fonction des débits pouvaient différer entre sites (Figure 15). Bien que la comparaison directe des cinétiques de dévalaison entre ces différents sites puisse notamment être faussée par différentes probabilités de capture ou d'observation des individus dévalants aux forts débits, on peut toutefois considérer qu'il existe une variabilité entre sites. Dans certains cours d'eau, la majorité des anguilles semble ainsi dévaler pour un débit inférieur au Q70 (ex : l'Aulne) alors que, dans certains autres, la majorité des anguilles semble dévaler pour des débits supérieurs au Q80, voire au Q90 (ex : la Sèvre Niortaise).



**Figure 15.** Proportion cumulée d'individus dévalants à différents débits classés (période de dévalaison des anguilles), dans différents cours d'eau, avec  $Q_x$  = débit non dépassé pendant  $x\%$  du temps (d'après des données récoltées dans le cadre du livrable SUDOANG 2.2.2). N.B. : La courbe du Gave de Pau, référence française jusqu'à ce jour, est différente de celle présentée sur la Figure 14 car les chroniques de débits utilisées ici sont différentes : il s'agit de l'ensemble des chroniques disponibles sur les périodes estimées de dévalaison de l'anguille, soit des données hydrologiques enregistrées entre 1923 et 2017 pour ce cours d'eau.

Par défaut, en l'absence de connaissances locales sur la cinétique de dévalaison et en vue de proposer un intervalle de confiance sur les estimations de mortalité proposées, il est intéressant de **tester deux scénarios contrastés** sur le site étudié. On pourra ainsi proposer deux diagnostics de mortalité, s'appuyant respectivement sur a) une cinétique de dévalaison comparable à celle de l'Aulne (majorité d'individus dévalants dans la gamme des débits les plus faibles) et b) une cinétique de dévalaison comparable à celle de la Sèvre Niortaise (majorité d'individus dévalant dans la gamme des débits les plus élevés) (voir les proportions d'individus dévalants à considérer aux différents débits dans le Tableau 2).

**Tableau 2.** Proportions d'individus dévalants pour différentes valeurs de débits caractéristiques dans différents cours d'eau ( $Q_x$  = débit non dépassé pendant x% du temps). Ces valeurs ont été obtenues en appliquant un modèle logistique sur les données présentées sur la Figure 15 (cette modélisation est présentée dans le livrable 2.2.2 de SUDOANG).

Sites	Q10	Q20	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q80	Q90	Q95	Q99
Aulne	0,00672	0,00939	0,02202	0,04948	0,10135	0,17315	0,22079	0,19642	0,12612	0,06492	0,02964
Elorn	0,00430	0,00605	0,01434	0,03308	0,07173	0,13654	0,20551	0,22122	0,16667	0,09491	0,04565
Gave de Pau	0,00252	0,00355	0,00849	0,01999	0,04533	0,09470	0,16782	0,22577	0,21290	0,14316	0,07577
Loire	0,01108	0,01531	0,03517	0,07554	0,14113	0,20609	0,21376	0,15578	0,08677	0,04125	0,01813
Orne	0,00866	0,01204	0,02797	0,06159	0,12090	0,19166	0,22047	0,17676	0,10508	0,05175	0,02312
Scorff	0,00887	0,01233	0,02860	0,06284	0,12282	0,19323	0,22009	0,17478	0,10321	0,05063	0,02258
Sèvre Niortaise	0,00101	0,00143	0,00344	0,00823	0,01944	0,04443	0,09434	0,17241	0,24316	0,24198	0,17015
Touques	0,04728	0,05992	0,11797	0,18793	0,21759	0,17555	0,10483	0,05175	0,02315	0,00990	0,00415
Vilaine	0,00153	0,00217	0,00521	0,01241	0,02889	0,06390	0,12664	0,20409	0,23998	0,19655	0,11864

Si possible, il est bien entendu plus approprié de vérifier le rythme de dévalaison sur le cours d'eau considéré dans le diagnostic afin d'affiner celui-ci, mais l'acquisition de ces connaissances nécessite des opérations de terrain généralement assez lourdes et répétées sur plusieurs années.

#### 4.1.2. Phase 2 : Calcul des débits journaliers au droit de l'aménagement

La phase précédente nécessite de connaître les **débits journaliers** à l'amont immédiat de l'aménagement diagnostiqué, *a minima* pendant la période considérée de migration des anguilles.

Si ces valeurs ne sont pas directement connues, il convient de récupérer les **données existantes** pour la station hydrométrique la plus proche possible (à l'amont ou à l'aval) de l'aménagement concerné (voir paragraphe 3.2.1), sur la période de dévalaison définie précédemment. Il est recommandé d'étudier au moins une dizaine d'années afin d'inclure dans l'analyse à la fois des années à forte hydrologie et d'autres à hydrologie faible. Les débits moyens journaliers au droit de l'ouvrage peuvent ensuite être recalculés en effectuant une **correction**, par exemple au **prorata de la surface de bassin versant** considérée (voir Lebecherel *et al.*, 2015). Pour cela, la formule de Myer est souvent utilisée :

$$Q_{TOT} = Q_s \times (S_a / S_s)^{0.8}$$

où :

- $Q_{TOT}$  : débit en amont immédiat de l'aménagement ( $m^3/s$ )
- $Q_s$  : débit au niveau de la station hydrométrique utilisée ( $m^3/s$ )
- $S_a$  : superficie du bassin versant au niveau de l'aménagement ( $km^2$ )
- $S_s$  : superficie du bassin versant au niveau de la station hydrométrique utilisée ( $km^2$ )

S'il n'y a pas d'apport ou de prélèvement significatif entre l'aménagement et la station hydrométrique étudiée, ces modèles de type "débit-débit" peuvent donner des résultats très satisfaisants (Andréassian *et al.*, 2012).

Une fois ces valeurs obtenues, les différentes valeurs caractéristiques de débit définies au 4.1.1 peuvent être calculées.

#### 4.1.3. Phase 3 : Estimation de la proportion d'individus dévalant au niveau des ouvrages évacuateurs

Le **modèle le plus simple** consiste à considérer que la répartition des poissons entre les différentes voies de passage (seuil vs usine) se fait au **prorata des débits** transitant par ces mêmes voies. Dans ce cas :

$$P = Q_{DEV} / Q_{TOT}$$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement ( $m^3/s$ )

Cette approche simple ne prend toutefois pas en compte la configuration des ouvrages évacuateurs et de la prise d'eau, qui peut significativement influencer la répartition des poissons.

De manière plus détaillée, on pourra utiliser les formules issues d'une synthèse d'études ayant suivi des anguilles marquées par télémétrie au niveau de 6 aménagements hydroélectriques pendant 4 saisons de dévalaison (Bau *et al.*, 2013). Les résultats montrent que le taux d'anguilles argentées transitant en surverse au niveau des seuils reste faible tant que le **débit du cours d'eau** ne devient pas très significativement supérieur au **débit turbiné** à la centrale. En effet, la courantologie n'attire pas les poissons vers le seuil en-deçà d'un certain débit déversé et, de plus, la présence d'une faible lame d'eau au-dessus du seuil provoque leur réticence à s'engager dans cette voie de passage.

De ce fait, **la proportion de poissons passant par déversement au niveau des seuils n'est pas tout à fait linéaire en fonction du rapport entre le débit déversé au seuil et le débit total du cours d'eau.**

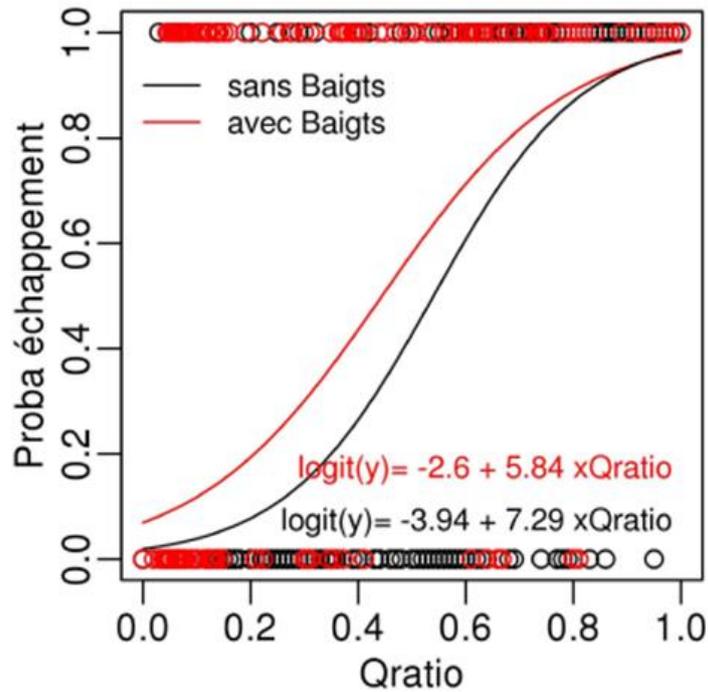
Bau *et al.* (2013) proposent une formule générale (la plus couramment utilisée) permettant d'estimer la proportion d'individus dévalants qui passent par un ouvrage évacuateur tel qu'un seuil (Figure 16) :

$$P = \exp(\eta) / (1 + \exp(\eta))$$

$$\text{avec : } \eta = -3,94 + 7,29 * (Q_{DEV} / Q_{TOT})$$

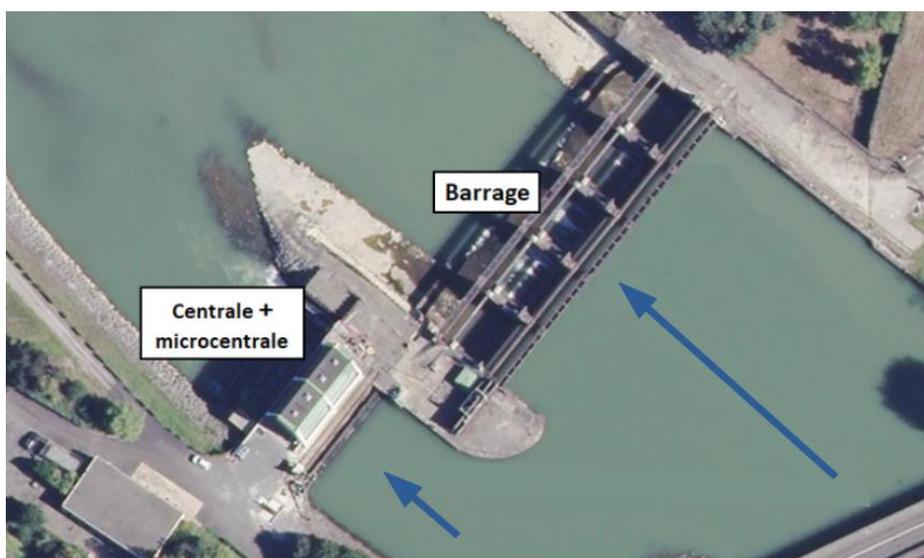
où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement ( $m^3/s$ )



**Figure 16.** Prédiction de la probabilité d'échappement d'anguilles dévalantes par le déversoir d'un barrage en fonction de la répartition du débit entre le barrage et l'usine hydroélectrique ( $Q_{ratio}$  = débit déversé au barrage divisé par le débit total du cours d'eau). La courbe noire correspond à la formule générale (voir texte). D'après Bau et al. (2013).

Bau *et al.* (2013) ont montré que P dépendait également de la **configuration physique de l'aménagement**, car celle-ci détermine notamment l'orientation des écoulements se dirigeant respectivement vers les ouvrages évacuateurs et vers l'usine. Une formule a donc été proposée pour chacun des cinq aménagements étudiés et il peut éventuellement s'avérer judicieux d'utiliser une de ces cinq formules spécifiques si la configuration physique de l'aménagement considéré ressemble fortement à l'une des installations suivantes.



**Figure 17.** Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique d'Artix (Gave de Pau, France). D'après Google Maps.

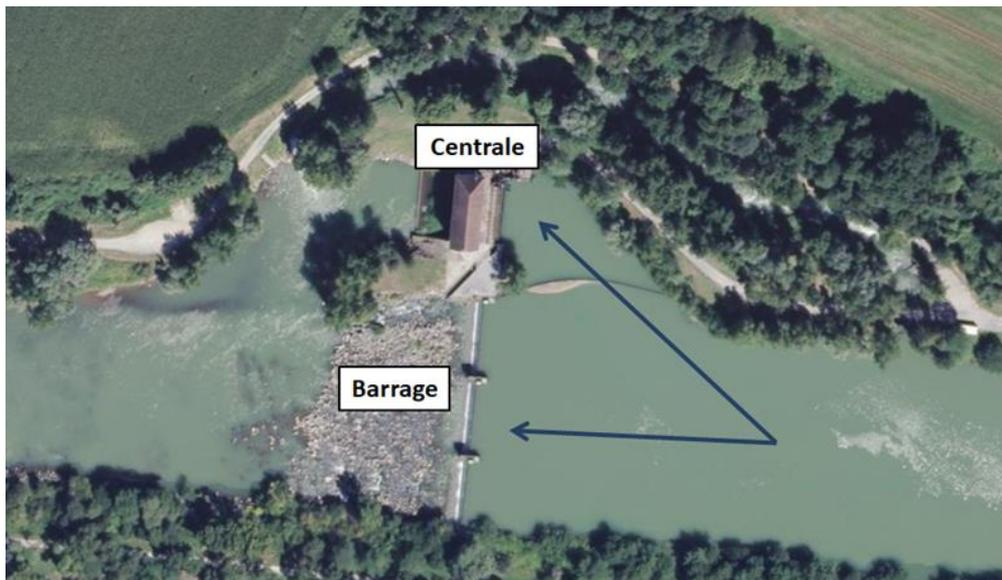
Dans le cas de la centrale d'Artix, le barrage et les centrales sont alignés (Figure 17). La formule propre à cette configuration est la suivante :

$$P = \exp(\eta)/(1+\exp(\eta))$$

avec :  $\eta = -4,99 + 7,91*(Q_{DEV}/Q_{TOT})$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit de la rivière ( $m^3/s$ )



**Figure 18.** Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique de Biron (Gave de Pau, France).  
D'après Google Maps.

La configuration de l'aménagement de Biron (Figure 18) est relativement comparable à celle d'Artix, mais le cours d'eau s'élargit significativement au niveau de l'aménagement. La formule propre à cette configuration est la suivante :

$$P = \exp(\eta)/(1+\exp(\eta))$$

avec :  $\eta = -1,69 + 4,53*(Q_{DEV}/Q_{TOT})$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit de la rivière ( $m^3/s$ )



**Figure 19.** Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique de Sapso (Gave de Pau, France). D'après Google Maps.

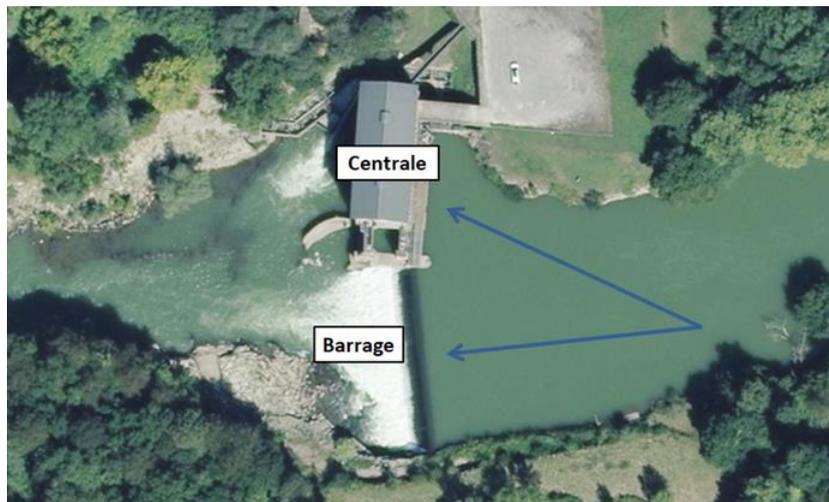
En ce qui concerne l'aménagement de Sapso (Figure 19), le barrage est plus long que dans les cas précédents et présente une orientation prononcée par rapport à l'axe du cours d'eau ; la centrale se trouve à l'extrémité d'un canal d'amenée. C'est une configuration qui va favoriser l'entraînement des poissons dans la prise d'eau. La formule propre à cette configuration est la suivante :

$$P = \exp(\eta) / (1 + \exp(\eta))$$

$$\text{avec : } \eta = -5,83 + 9,36 * (Q_{\text{DEV}} / Q_{\text{TOT}})$$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{\text{DEV}}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $Q_{\text{TOT}}$  : débit de la rivière ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



**Figure 20.** Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique de Castetarbe (Gave de Pau, France). D'après Google Maps.

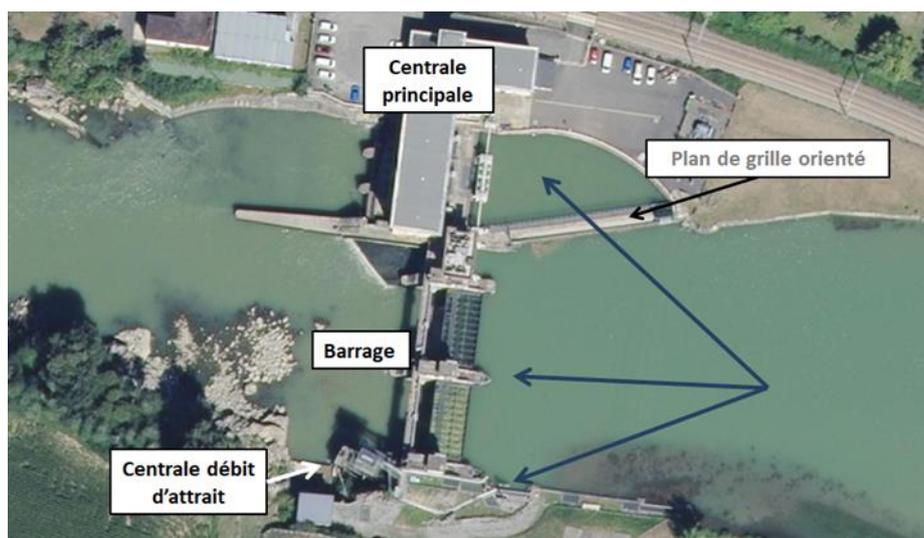
La centrale de Castetarbe (Figure 20) est alignée avec le seuil. Elle est équipée d'un plan de grille avec un espacement de 25 mm entre les barreaux, qui bloque les plus grosses anguilles qui se dirigent alors vers le seuil adjacent. De ce fait, plus les anguilles sont de taille importante, plus elles ont une chance de passer par le seuil. C'est pourquoi la formule propre à cette configuration inclut un paramètre relatif à la taille des poissons. La formule est la suivante :

$$P = \exp(\eta) / (1 + \exp(\eta))$$

$$\text{avec : } \eta = -11,7 + 5,61 * (Q_{\text{DEV}} / Q_{\text{TOT}}) + 0,0129 * LT$$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{\text{DEV}}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $Q_{\text{TOT}}$  : débit de la rivière ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- LT : longueur des poissons (mm)



**Figure 21.** Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique de Baigts (Gave de Pau, France).  
D'après Google Maps.

L'aménagement de Baigts (Figure 21) présente un plan de grille orienté, positionné dans le prolongement de la berge et guidant les poissons vers le barrage, avec un espacement entre barreaux de 30 mm au moment de l'étude (réduit à 20 mm aujourd'hui). La répartition des poissons entre les différentes voies de passage dépend, comme dans le cas précédent, de leur taille, qui est donc à nouveau un paramètre inclus dans l'équation<sup>7</sup>. La formule propre à cette configuration est la suivante :

<sup>7</sup> A noter que la centrale qui turbine le débit d'attrait de la passe à poisson, en rive gauche, possède un plan de grille avec un espacement entre les barreaux de 20 mm.

$$P = \exp(\eta)/(1+\exp(\eta))$$

$$\text{avec : } \eta = - 6,2 + 3,64*(Q_{DEV}/Q_{TOT}) + 0,00817 \times LT$$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit de la rivière ( $m^3/s$ )
- LT : longueur des poissons (mm)

#### 4.1.4. Phase 4 : Estimation de la part de débit déversée au niveau du seuil

Une fois la bonne formule choisie (voir phase précédente), il convient de déterminer le plus précisément possible le rapport  $Q_{DEV}/Q_{TOT}$ , utilisé dans chacune des formules. Pour cela, il faut calculer le **débit déversé ( $Q_{DEV}$ )**, qui correspond à **la part du débit total ( $Q_{TOT}$ ) qui n'est pas turbiné<sup>8</sup>**. En règle générale :

$$Q_{DEV} = Q_{TOT} - Q_{TUR}$$

où :

- $Q_{DEV}$  : débit déversé par les ouvrages évacuateurs ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement ( $m^3/s$ )
- $Q_{TUR}$  : débit turbiné ( $m^3/s$ )

Si l'eau dérivée par l'aménagement n'est pas restituée directement au pied du seuil, un débit réservé ( $Q_{RES}$ ) doit être déversé au niveau du seuil pour alimenter le tronçon court-circuité. Dans ce cas, la valeur de  $Q_{DEV}$  ne peut être inférieure à celle de  $Q_{RES}$ .

→ La **probabilité d'échappement des anguilles au niveau du seuil** est alors calculée en utilisant la bonne formule (phase 3) pour chaque débit classé d'intérêt ( $Q_{X1}, Q_{X2}, Q_{X3}... Q_{Xn}$ ), puis une moyenne (pondérée par la proportion de poissons dévalant à chaque  $Q_{Xi}$ , voir paragraphe 4.1.1) est ensuite calculée afin d'estimer un taux d'échappement moyen.

## 4.2. Estimation de la mortalité au passage des ouvrages évacuateurs

Ce paragraphe expose la façon d'utiliser les données pour répondre à l'étape **2** de la Figure 9.

Il n'existe **pas de formule précise** pour calculer cette mortalité, qui est très souvent considérée comme nulle lors des diagnostics. D'après les critères connus actuellement<sup>9</sup>, on considère qu'il n'y a pas de dommages sur les poissons dévalants lorsque :

---

<sup>8</sup> Par abus de langage, car c'est en fait le débit qui ne passe ni dans les turbines, ni dans les exutoires de dévalaison le cas échéant.

<sup>9</sup> Voir onglet "Risques de mortalité" sur la page : <https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/continuite-ecologique/demarche-diagnostic-devalaison-franchissabilite-ouvrage-120>

- la **chute est inférieure à une dizaine de mètres** ;
- la **fosse de réception en pied de chute est assez profonde**, c'est-à-dire que le matelas d'eau représente au minimum un quart de la chute, ou présente une profondeur d'1 m minimum pour les chutes inférieures à 4 m ;
- on constate une **absence d'éléments agressifs** au pied de la chute.

Au-delà d'une expertise au cas par cas prenant en compte ces facteurs, la mortalité des anguilles lors de leur passage au niveau des seuils et ouvrages évacuateurs a fait l'objet de peu d'études. Il peut cependant y avoir un risque d'abrasion des poissons sur certains types de seuil et/ou de chocs sur les parties maçonnées ou sur le substrat présent en pied de chute. De ce fait, l'utilisation d'un taux de mortalité de 0% au niveau de certains seuils peut représenter une sous-évaluation.

### 4.3. Efficacité du plan de grille et des exutoires associés (si existants)

Ce paragraphe expose la façon d'utiliser les données pour répondre à l'étape **3** de la Figure 9.

Il n'existe actuellement **pas de formule précise** prenant en compte les caractéristiques d'un plan de grille pour en calculer l'efficacité. Toutefois, afin de fournir des éléments d'aide au diagnostic, ce paragraphe présente :

- les critères actuellement préconisés en France (Courret et Larinier, 2008), qui permettent d'atteindre une efficacité d'environ 100% pour arrêter les anguilles dévalantes d'une longueur supérieure à 55 cm (Tomanova *et al.*, 2019)<sup>10</sup> ; le cas échéant, certains critères appliqués dans d'autres pays seront également évoqués ;
- des avis d'experts sur l'efficacité, en termes d'arrêt et de guidage des anguilles vers une voie sûre, de divers plans de grille présentant des configurations différentes.

#### 4.3.1. Espacement libre maximal entre les barreaux

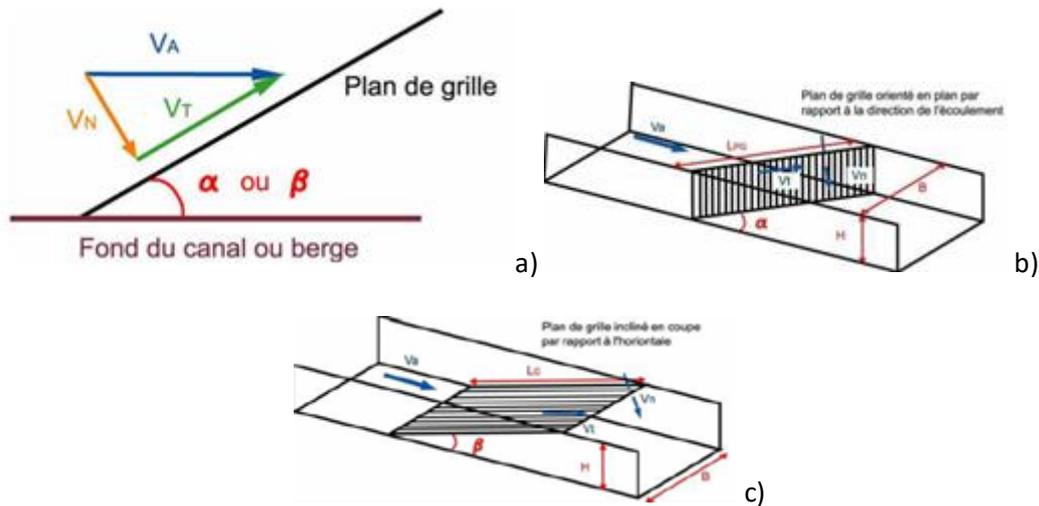
À la différence des smolts de salmonidés, qui peuvent hésiter à franchir une grille suffisamment resserrée, une certaine fraction des anguilles a tendance à aller au contact de la grille et à forcer le passage. Elles doivent donc être arrêtées par une barrière physique, au travers de laquelle elles n'ont aucune chance de passer. Une grille constitue cette barrière physique pour une anguille si l'espacement libre maximum entre les barreaux est inférieur à la largeur de sa tête. En France, l'espacement préconisé entre les barreaux (plans de grille inclinés et orientés) est de **20 mm** pour arrêter et guider les **femelles** mesurant plus de 50 à 60 cm. Il peut être réduit à **15 mm** (Courret et Larinier, 2008)<sup>11</sup> pour les centrales situées en aval des bassins versants, où l'on note une présence significative de **mâles**, plus petits.

<sup>10</sup> Suivi de 194 individus marqués, au niveau de 5 centrales hydroélectriques sur la rivière Ariège (France).

<sup>11</sup> 20 mm recommandés aux USA (U.S. Fish and Wildlife Service, 2017), 9 à 18 mm en Allemagne et 12,5 mm au Royaume-Uni (Ebel, 2013 ; DWA, 2005 ; Environment Agency, 2012).

#### 4.3.2. Vitesse normale maximale admissible au niveau du plan de grille

Une vitesse normale ( $V_N$ ) trop importante au niveau du plan de grille (Figure 22) peut épuiser les poissons et, *in fine*, induire leur placage contre la grille. En France, la valeur maximale préconisée pour cette vitesse est de l'ordre de 0,5 m/s (Courret et Larinier, 2008)<sup>12</sup>.



**Figure 22.** a) Composantes de la vitesse d'écoulement à l'approche d'un plan de grille (cf. Figure 13) et angle d'orientation par rapport à la berge [ $\alpha$ , plan de grille orienté, b)] ou d'inclinaison par rapport au fond du canal [ $\beta$ , plan de grille incliné, c)]. D'après Courret et Larinier (2008).

Afin d'obtenir la vitesse normale ( $V_N$ ) au niveau d'un plan de grille, il faut dans un premier temps connaître la vitesse d'approche ( $V_A$ , Figure 22) de l'écoulement :

$$V_A = Q_{TUR}/S$$

où :

- $V_A$  : vitesse d'approche (m/s)
- $Q_{TUR}$  : débit turbiné (m<sup>3</sup>/s)
- $S$  : section d'écoulement de la prise d'eau (m<sup>2</sup>)

La vitesse normale ( $V_N$ ) peut ensuite être calculée grâce à la vitesse d'approche ( $V_A$ ) et à l'angle  $\alpha$  (plans de grille orientés) ou  $\beta$  (plans de grilles inclinés) (voir Figure 22) :

$$V_N = V_A \times \sin\alpha \text{ (pour les plans de grilles orientés)}$$

$$V_N = V_A \times \sin\beta \text{ (pour les plans de grilles inclinés)}$$

<sup>12</sup> 0,5 m/s recommandé aussi au Royaume-Uni (Environment Agency, 2012), environ 0,6 m/s aux USA (U.S. Fish and Wildlife Service, 2017) et environ 0,4 m/s en Allemagne (Ebel, 2013).

La vitesse normale peut également être obtenue en divisant le débit maximum turbiné par l'aire immergée du plan de grille :

$$V_N = Q_{TUR}/A$$

où :

- $V_N$  : vitesse normale (m/s)
- $Q_{TUR}$  : débit turbiné (m<sup>3</sup>/s)
- $A$  : aire immergée du plan de grille (m<sup>2</sup>)

Notons que le **guidage des poissons** vers les exutoires sera d'autant meilleur que la vitesse tangentielle ( $V_T$ , Figure 22) est importante par rapport à la vitesse normale ( $V_N$ ). Il est possible de calculer cette vitesse tangentielle  $V_T$  (m/s) grâce à la vitesse normale  $V_N$  et à l'angle  $\alpha$  (plans de grille orientés) ou  $\beta$  (plans de grille inclinés).

$$V_T = V_A \times \cos\alpha \text{ (pour les plans de grilles orientés)}$$

$$V_T = V_A \times \cos\beta \text{ (pour les plans de grilles inclinés)}$$

#### 4.3.3. Inclinaison des plans de grilles inclinés

L'inclinaison des plans de grille inclinés est un paramètre important puisqu'elle influe directement sur la surface de grille (voir précédemment) et permet de guider plus ou moins rapidement les poissons vers d'éventuels exutoires. Plus le plan de grille est incliné (i.e. plus l'angle entre la grille et le sol est faible), plus la vitesse tangentielle est importante et plus les poissons seront guidés efficacement vers le sommet du plan de grille, où doivent se trouver le ou les exutoire(s). Ainsi, il est recommandé que l'**angle  $\beta$**  (Figure 22) soit **inférieur ou égal à 26°**, afin que la vitesse tangentielle ( $V_T$ ) soit au moins 2 fois supérieure à la vitesse normale ( $V_N$ ) (Courret et Larinier, 2008)<sup>13</sup>. Cependant, lorsque la vitesse moyenne d'approche est supérieure à 0.80-0.85 m/s, le plan de grille doit être plus incliné (moins de 26°) pour respecter le critère de la vitesse normale maximale.

#### 4.3.4. Orientation des plans de grille orientés

L'orientation de la grille crée un écoulement tangentiel au plan de grille permettant de guider les poissons vers un exutoire positionné à l'extrémité aval. Plus le plan de grille est orienté (plus l'angle entre la grille et le bord de la berge est faible), plus les poissons seront guidés efficacement vers l'exutoire. Il est recommandé que l'**angle  $\alpha$**  (Figure 22) soit **inférieur ou égal à 45°**, afin que la vitesse tangentielle ( $V_T$ ) soit supérieure ou égale à la vitesse normale ( $V_N$ ) (Courret et Larinier, 2008)<sup>14</sup>.

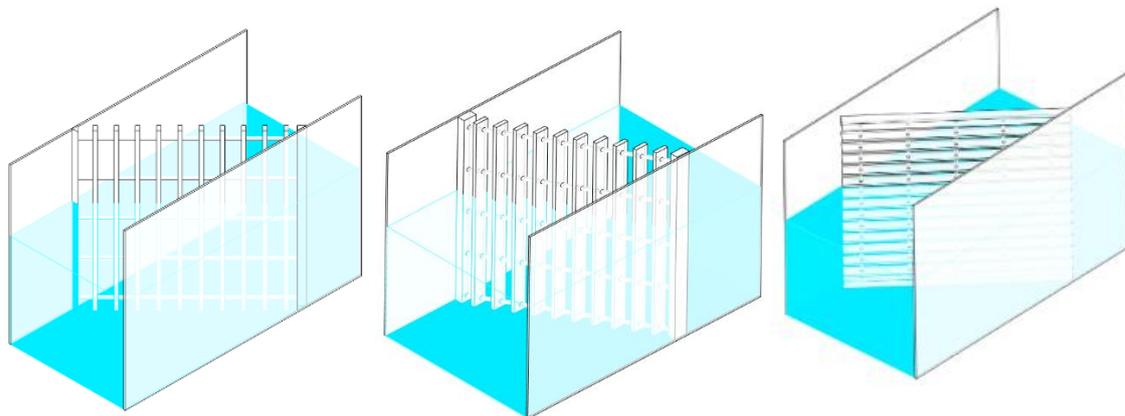
Dans le cas d'un plan de grille "conventionnel" (barreaux perpendiculaires à l'axe du plan de grille), du fait d'une accélération de la vitesse d'écoulement le long de la grille, et pour conserver une vitesse normale ( $V_N$ ) inférieure à 0,5 m/s (voir paragraphe 4.3.2), **la vitesse d'approche ( $V_A$ ) maximale**

<sup>13</sup> La recommandation est la même en Suisse (Hefti, 2012).

<sup>14</sup> La recommandation est la même aux Etats-Unis (U.S. Fish and Wildlife Service, 2017).

**préconisée est de 0,5 m/s.** Elle peut être légèrement supérieure si l'angle  $\alpha$  est réduit et la surface du plan de grille augmentée (Raynal *et al.*, 2014).

Certains plans de grilles orientés présentent des barreaux horizontaux ou des barreaux placés dans le sens du courant (Figure 23). Dans ces cas, la vitesse normale ne change pas le long de la grille (Raynal *et al.*, 2014 ; Szabo-Meszaros *et al.*, 2018) et la vitesse d'approche maximale recommandée est de 0,6 m/s pour un angle de 45°. Si la vitesse d'approche est plus élevée, il est nécessaire de réduire l'angle  $\alpha$  à des valeurs de 40°, 35° ou 30° pour des vitesses d'approche de 0.65, 0.75 et 0.85 m/s respectivement.



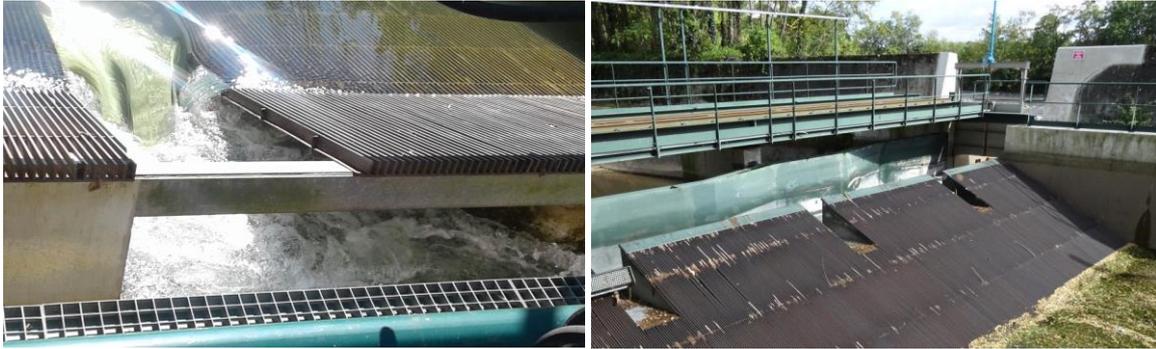
**Figure 23.** Illustration schématique des 3 modes d'assemblage des barreaux dans le cas des grilles orientées : grille "conventionnelle" à gauche, à barreaux alignés dans le sens de l'écoulement au centre et à barreaux horizontaux à droite (d'après Lemkecher *et al.*, accepted).

#### 4.3.5. Recommandations pour les exutoires et les goulottes de dévalaison

##### 4.3.5.1. Existence d'un ou de plusieurs exutoires bien placés

Une fois les poissons arrêtés par le plan de grille, les écoulements doivent les guider rapidement vers un exutoire de dévalaison.

**Dans le cas des plans de grille inclinés** (Figure 24), le ou les exutoire(s) sont généralement placé(s) en surface, au sommet du plan de grille, et il est nécessaire d'en implanter plusieurs si la largeur du plan de grille est importante.



**Figure 24.** Exutoires au sommet de plans de grilles inclinés (photos P. Sagnes – OFB).

L'**espace recommandé entre les exutoires** dépend de leur nombre et de leur emplacement ; il est préconisé de laisser :

- environ 6 m entre deux exutoires en berge ;
- environ 5 m entre un exutoire en berge et un exutoire non attenant à la berge ;
- environ 4 m entre deux exutoires non attenants à la berge ;
- environ 2 m entre un exutoire non attenant à la berge et une berge.

En France, il est également préconisé d'obturer le sommet de grille entre les exutoires (sur la hauteur de ceux-ci) afin de générer des courants transversaux qui guideront les poissons.

**Dans le cas des plans de grille orientés** (Figure 25), l'exutoire doit être situé à l'**extrémité aval** du plan de grille et le plus proche possible de celui-ci. L'idéal est que la hauteur de l'exutoire corresponde à toute la colonne d'eau. Dans le cas de plans de grille très longs, il peut être envisagé d'implanter des exutoires intermédiaires (Courret et Larinier, 2008).



**Figure 25.** Exutoire à l'aval d'un plan de grille orienté (photo M. Larinier – Onema).

Des **exutoires de fond** sont envisageables pour l'anguille, qui a tendance à prospecter au fond du canal d'amenée lorsqu'elle est efficacement arrêtée par un plan de grille. Cependant, ces exutoires sont sensibles au colmatage et difficiles à entretenir.

#### 4.3.5.2. Débit alloué à la dévalaison par rapport au débit maximal turbiné

Plus le débit alloué à la dévalaison [i.e. transitant par le ou les exutoire(s)] est important au regard du débit turbiné, plus l'exutoire est attractif.

**Pour les plans de grille inclinés**, la proportion de débit alloué à la dévalaison préconisée en France varie entre **5-6% pour les petites installations** et **2-3% pour un débit turbiné supérieur à 50 m<sup>3</sup>/s**. Pour les installations ayant un débit turbiné supérieur à 100 m<sup>3</sup>/s, le débit transitant par le ou les exutoires peut être encore plus faible.

**Pour les plans de grille orientés**, il n'y pas de critères aussi précis que pour les plans de grilles inclinés mais il est recommandé d'allouer aux exutoires au moins **2 à 5% du débit turbiné** (Courret *et al.*, 2015)<sup>15</sup>.

Il est possible d'estimer le débit alloué à la dévalaison grâce à la formule suivante (Courret *et al.*, 2015) :

$$Q_b = N_b * B_b * H_b * V_b$$

où :

- $Q_b$  : Débit alloué à la dévalaison (m<sup>3</sup>/s)
- $N_b$  : Nombre d'exutoires
- $B_b$  : Largeur des exutoires (m)
- $H_b$  : Hauteur des exutoires (m)
- $V_b$  : Vitesse à l'entrée des exutoires (m/s)

#### 4.3.5.3. Dimensionnement des exutoires

En France, il est préconisé une **largeur d'environ 1 m** pour les exutoires des plans de grilles inclinés et la largeur cumulée des exutoires doit être à peu près égale à **20-25% de la largeur totale de la prise d'eau**. La **profondeur** de l'exutoire doit être au minimum égale à **0.5 m**.

En ce qui concerne les plans de grille orientés, les exutoires doivent être aussi profonds que possible avec un minimum de 0.5 m (Courret *et al.*, 2015)<sup>16</sup>.

#### 4.3.5.4. Vitesse à l'entrée des exutoires

En France, les recommandations sont les suivantes<sup>17</sup> :

---

<sup>15</sup> 5-10% du débit turbiné recommandé en Allemagne (Ebel, 2013), 2% minimum pour les plans de grilles inclinés aux USA (Environment Agency, 2005) et 5% pour les plans de grilles inclinés au Royaume-Uni (Environment Agency, 2005).

<sup>16</sup> Aux USA pour les plans de grille orientés, largeur recommandée de 0,4 à 0,6 m avec une profondeur de l'exutoire égale à la profondeur de la prise d'eau (Rainey, 1985). En Allemagne, la largeur recommandée est de 0,4 à 0,6 m et la profondeur de 0,6 à 0,9 m (Ebel, 2013).

<sup>17</sup> En Allemagne,  $V_p = 1.0-2.0*V_A$  (Ebel, 2013), aux USA l'étude la plus récente préconise :  $V_p = 1.0 - 1.5* V_A$  quel que soit le type de plan de grille (incliné ou orienté) (USBR, 2006).

- **pour les plans de grilles inclinés**, la vitesse à l'entrée des exutoires ( $V_p$ ) doit être égale à 1,1 fois la vitesse d'approche ( $V_A$ ) ;

- **Pour les plans de grille orientés** à  $45^\circ$ , la vitesse à l'entrée des exutoires ( $V_p$ ) doit être égale à 1,7 fois la vitesse d'approche ( $V_A$ ). Pour les plans de grille orientés avec des barreaux positionnés dans le sens du courant ou à barreaux horizontaux, la vitesse à l'entrée de l'exutoire ( $V_p$ ) doit être égale à la vitesse d'approche ( $V_A$ ) (Courret *et al.*, 2015).

#### 4.3.5.5. *Dimensionnement de la goulotte de dévalaison et transfert des poissons vers l'aval*

Pour éviter des blessures aux poissons, la goulotte de dévalaison doit être dimensionnée de manière à ce que la vitesse à l'intérieur ne dépasse pas 5 à 6 m/s (Guensch *et al.*, 2002). Les transitions et les changements de vitesses tout au long du système de transfert vers l'aval doivent être graduels pour éviter les cisaillements, les brusques changements de pression et les fortes turbulences, potentielles sources de blessures pour les poissons.

Dans le cas des plans de grille inclinés, la goulotte de dévalaison, qui recueille les poissons ayant franchi les exutoires, longe le sommet du plan de grille. Dans l'idéal, il faut **conserver dans la goulotte la même vitesse que dans les exutoires**. Pour y parvenir, une solution consiste à augmenter la largeur de la goulotte au fur et à mesure que les exutoires y débouchent (Figure 26). Lorsque le nombre d'exutoires est important, il s'avère difficile de respecter strictement ce critère. Dans ce cas-là, il est important d'essayer de **ne pas dépasser 1m/s** dans la goulotte.



**Figure 26.** Goulotte au sommet d'un plan de grille incliné. L'écoulement va du haut vers le bas sur la photo et la goulotte s'élargit au fur et à mesure que les exutoires de dévalaison y débouchent (photo D. Courret - OFB).

Faisant suite à la goulotte collectrice, le **système d'évacuation des poissons** vers l'aval (exemple en Figure 27) doit respecter certains critères afin d'éviter de blesser les poissons :

- Le transfert vers l'aval doit se faire de préférence grâce à un **canal ouvert**, sinon par une conduite (mais sensibilité au colmatage et entretien plus difficile) ;
- La **hauteur d'eau** dans le canal souhaitable est de **20-25 cm**, *a minima* 10-15 cm ;
- La **vitesse** dans l'ouvrage doit rester inférieure à **8-10 m/s** ;
- La **chute** entre la sortie du canal et le plan d'eau aval doit idéalement être inférieure à 5 m (dans tous les cas inférieure à 10-12 m) ;
- Le rejet doit s'effectuer dans une **zone de profondeur suffisante** pour éviter tout risque de blessure par choc mécanique (au même titre que pour les poissons chutant au niveau du seuil, cf. paragraphe 4.2).

Des études sont actuellement en cours en France pour préciser ces recommandations (partenariat OFB-EDF).



**Figure 27.** Système de transfert des poissons dévalants, en aval d'un plan de grille et d'une goulotte collectrice (photo D. Courret - OFB).

#### 4.3.6. Exemples d'évaluations de l'efficacité de plans de grilles à dire d'expert

Si tous les éléments constitutifs du système de dévalaison, présentés précédemment, répondent aux préconisations proposées, l'efficacité biologique du dispositif pour les anguilles (c'est-à-dire la proportion d'individus arrivant dans la prise d'eau et qui évitent un passage dans les turbines) est considérée proche de 100%. Des retours d'expérience récents ont permis de conforter cette conclusion pour les individus d'une longueur supérieure à 55 cm (Tomanova *et al.*, 2019). En revanche, lorsqu'un ou plusieurs paramètre(s) sont fortement éloignés de ces recommandations (par exemple, un espacement entre les barreaux trop important), l'efficacité peut être rapidement très réduite, voire nulle. Entre ces deux cas extrêmes, **il est difficile d'évaluer précisément cette efficacité** autrement que par expertise. Aussi, pour aider à une évaluation de l'efficacité des prises d'eau dont la conception n'est

*a priori* pas optimale du point de vue biologique, il est intéressant de disposer de quelques avis d'experts dans des situations contrastées (Tableau 3).

**Tableau 3.** Exemples d'évaluation de l'efficacité de différents plans de grille, en fonction de leurs caractéristiques, à dire d'experts (d'après ECOGEA, 2014). NR = non renseigné. A noter qu'un grand nombre de ces plans de grilles ont été modifiés depuis, en vue d'améliorer cette efficacité.

Cours d'eau	Nom centrale	Débit alloué à la dévalaison par rapport au débit turbiné (%)	Qualité implantation de l'exutoire	Espacement entre barreaux (mm)	Inclinaison du plan de grille (°)	Commentaire	Efficacité estimée (%) pour des anguilles de longueur ≈ 70 cm
Gave d'Ossau	Usine de Merville	1,4	Mauvaise implantation	65	48		0
	Centrale de Castet	0	Pas d'exutoire	80	70		0
	Usine de Ponsa	NR	Mauvaise implantation	40	30	Absence de courant tangentiel	0
	Centrales du stade	4-4,5% au barrage	Mauvaise implantation	20 au barrage et 50 à l'usine	25 au barrage et à l'usine		Proche de 100 au barrage et 0 à l'usine
	Centrale des Tanneries	NR	Mauvaise implantation	50 à l'usine et 20 au barrage	27 à l'usine et vertical au barrage		Proche de 100 au barrage et 0 à l'usine
	Centrale Cau Amont	2,5	Bonne implantation	40 sur 1/3 30 sur 2/3	NR		25
	Centrale Cau Aval	2,6	Bonne implantation	33	30	Vitesse très forte dans le canal d'amenée et léger courant tangentiel	0
	Saint Cricq	3,3	Bonne implantation	25	55	Exutoire fermé en période de dévalaison de l'anguille	75
	Usine de Lailhacar	1,9	Bonne implantation	60	NR		0
	Usine d'Abadie	2,8 en théorie mais 2 fois moins en réalité	Mauvaise implantation	30	60	La passe à poissons joue le rôle de deuxième exutoire	25
	Usine de Loubière	5	Bonne implantation	30	NR	Vitesse d'approche très forte	25
	Gave d'Aspe	Centrale d'Esquit	7	Mauvaise implantation	40	54	Absence de courant tangentiel et Exutoire fermé en période de dévalaison de l'anguille
Prise d'eau de Bedous		1,6 à 3,9	Mauvaise implantation	30	NR		25
Centrale de Gurmençon		1,8	Mauvaise implantation	50	NR		0
Centrale Sainte Marie		3,5	Mauvaise implantation	35	70	Vitesse d'approche importante et absence de courant tangentiel	0
Centrale Sainte Claire		3,2	Mauvaise implantation	40	20		0

## 4.4. Calcul du taux de mortalité dans différents types de turbines

Ce paragraphe expose la façon d'utiliser les données pour répondre à l'étape **4** de la Figure 9. Le code "R" utilisé pour ce calcul dans le cadre de SUDOANG est présenté en Annexe.

### 4.4.1. Turbines "ichthyocompatibles"

Les deux types de turbines reconnues comme ichthyocompatibles en France sont les turbines de type VLH et les vis hydrodynamiques. En présence exclusive de ces turbines, on considère que la **mortalité** des anguilles argentées en dévalaison est **nulle**.

*N.B. : Attention toutefois à leur impact sur d'autres espèces ; par exemple, la mortalité pourrait être non négligeable dans les turbines VLH pour les adultes de saumons atlantiques ravalés<sup>18</sup>.*

### 4.4.2. Turbines Pelton

Le taux de mortalité des poissons (toutes espèces confondues) passant dans une turbine Pelton est de **100%**.

### 4.4.3. Turbines Kaplan

Idéalement, les dommages potentiels subis par des poissons lors de leur transit à travers une turbine doivent être évalués à partir d'expérimentations, consistant notamment à injecter des poissons dans la turbine. Il s'agit cependant d'opérations très lourdes, qui ne peuvent être menées que sur un nombre très limité de sites. Généralement, ces dommages sont donc estimés grâce à des **formules prédictives**, établies à partir d'expérimentations effectuées sur d'autres sites, ou en **extrapolant les résultats** de tests effectués sur des turbines présentant des caractéristiques voisines de celle étudiée.

Des formules permettant d'estimer un ordre de grandeur des pourcentages de mortalités d'anguilles dévalantes en fonction de leur taille et des caractéristiques des turbines Kaplan ont été proposées (Gomes et Larinier, 2008). Elles proviennent du recueil, de l'évaluation et de l'analyse des résultats de tous les tests significatifs de mortalités effectués en Europe et en Amérique du Nord avant 2008. Trois expressions permettant d'estimer ce pourcentage de mortalité ont ainsi été proposées :

$$\begin{aligned}M1 &= 4,67.TL^{1.53}.Dr^{-0.48}.N^{0.6} \\M2 &= 6,59.TL^{1.63}.Q^{-0.24}.N^{0.63} \\M3 &= 12,42.TL^{1.36}.Q^{-0.22}.Dr^{-0.10}.N^{0.49}\end{aligned}$$

où :

- $M_i$  : Pourcentage de mortalité (%)
- TL : Longueur du poisson (m)

<sup>18</sup> Voir ECOGEA (2013) et "<https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/continuite-ecologique/turbines-ichthyocompatibles-140>"

- Dr : Diamètre de la roue à mi-pales (m)
- Q : Débit d'équipement (m<sup>3</sup>/s)
- N : Vitesse de rotation de la turbine (tours/min)

Si tous les paramètres sont disponibles, la moyenne des mortalités obtenues par les trois formules est réalisée. Si la valeur d'un paramètre est inconnue, une seule formule (M1 ou M2) peut être utilisée.

Ces formules permettent d'obtenir un taux de mortalité pour différentes tailles d'anguilles. Cela peut être utile en fonction des caractéristiques de la "population" d'anguilles locale, par exemple une majorité de femelles, plus grandes que les mâles, dans les zones amont. Si les tailles d'individus sont inconnues, le taux de mortalité est généralement estimé pour trois tailles d'anguilles : 50, 70 et 90 cm.

#### 4.4.4. Turbines Francis

Le nombre d'expérimentations visant à caractériser la mortalité d'anguilles après leur passage dans des turbines Francis est trop limité pour pouvoir disposer d'une relation prédictive robuste. De ce fait, c'est une **formule d'estimation de mortalité établie pour les smolts de saumon atlantique** (Bosc et Larinier, 2000) qui est habituellement utilisée :

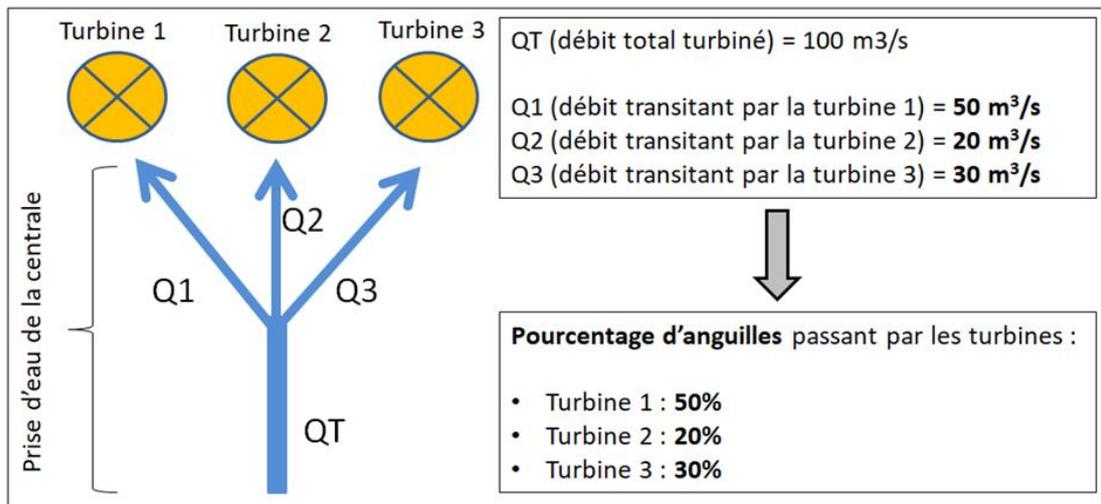
$$P = [\text{SIN} (-17.98 + 45.62 * H^{0.181} * D^{-0.207} * TL^{0.224})] ^2$$

où :

- P : Part de mortalité (0<M<1)
- TL : Longueur du poisson (m)
- D : Diamètre de la turbine (m)
- H : Chute nette (m)

#### 4.4.5. Présence de plusieurs turbines dans une même prise d'eau

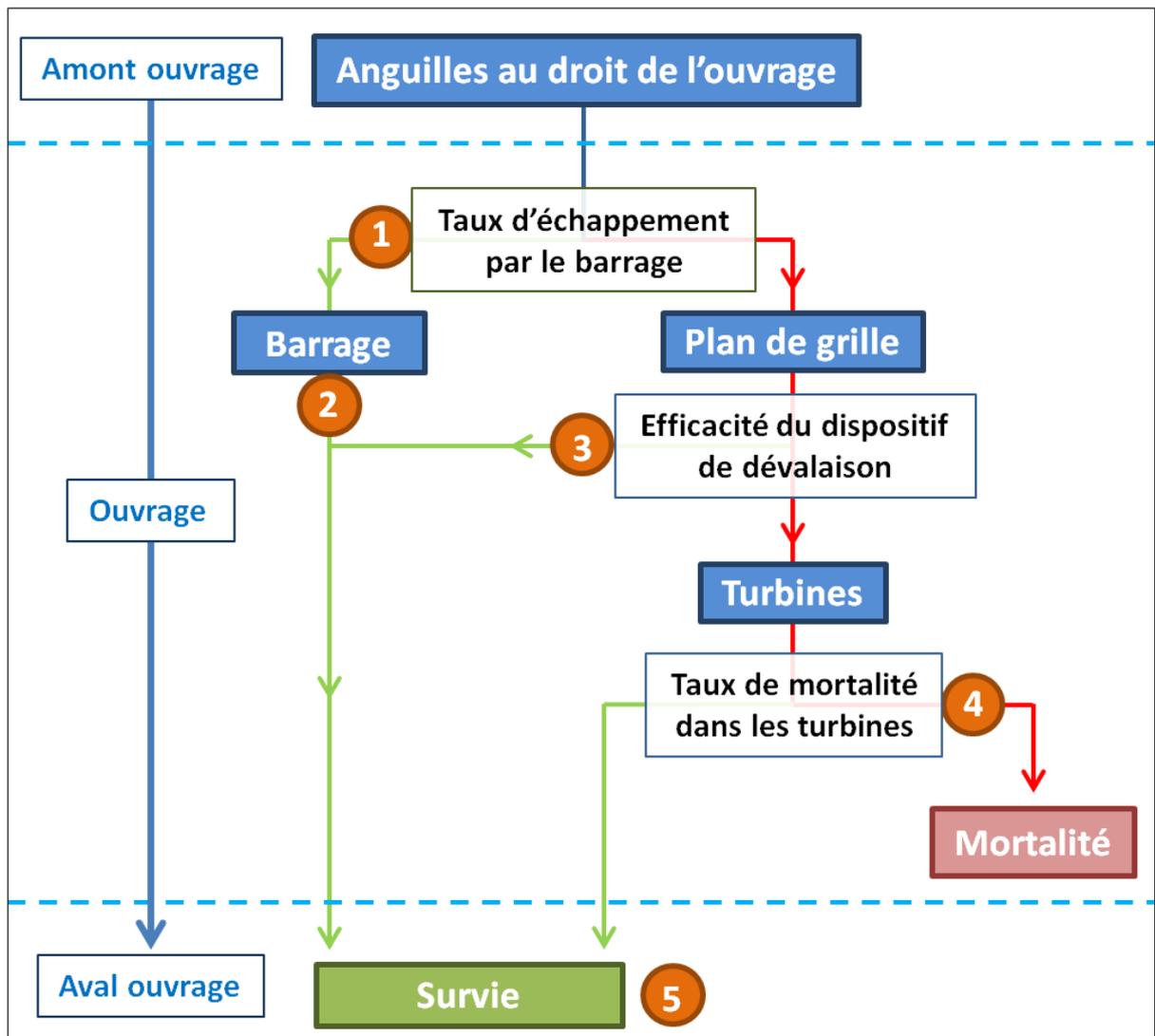
Une même prise d'eau peut alimenter une ou plusieurs turbines, qui ne possèdent pas forcément les mêmes caractéristiques. Les débits turbinés par chacune d'elles peuvent être différents. Il convient donc d'évaluer la fraction d'anguilles transitant par chaque turbine. Pour cela, on fait l'hypothèse que les anguilles se répartissent proportionnellement au débit turbiné par chaque machine (Figure 28). En cas de turbines multiples, les **taux de mortalité** calculés pour chaque turbine à l'aide des équations présentées précédemment seront donc **pondérés par la proportion de débit passant par chacune d'elles**.



**Figure 28.** Distribution des débits entre trois turbines alimentées par une même prise d'eau et déduction de la part d'anguilles transitant dans chacune d'elles.

#### 4.5. Bilan de la mortalité au niveau de l'ensemble de l'aménagement hydroélectrique

La Figure 29 rappelle les différentes étapes permettant d'estimer le taux de mortalité global pour des anguilles dévalant au droit d'un aménagement hydroélectrique, et de répondre à l'étape **5** de la Figure 9. Pour mémoire, le taux de mortalité global dépend de la proportion de poissons passant au niveau des ouvrages évacuateurs de crues, de l'efficacité du dispositif de dévalaison potentiellement installé en amont des turbines (par exemple un plan de grille fine + des exutoires associés) et du taux de mortalité des poissons qui transitent par les turbines.



**Figure 29.** Différentes étapes permettant d'estimer le taux de mortalité global de poissons dévalant au droit d'un aménagement hydroélectrique.

#### 4.6. Exemple d'un diagnostic à l'échelle d'un aménagement hydroélectrique

Afin de mieux comprendre la méthode proposée, ce paragraphe détaille les modalités de calcul sur un exemple concret. L'aménagement étudié comprend une centrale équipée de 2 turbines Kaplan et présente un débit d'équipement total de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tableau 4).

**Tableau 4. Caractéristiques de l'aménagement hydroélectrique étudié.**

<b>Caractéristiques de l'aménagement</b>		
Débit d'équipement (m <sup>3</sup> /s)	10	
Débit réservé (m <sup>3</sup> /s)	10	
Longueur de cours d'eau court-circuitée (m)	1000	
Espacement libre entre les barreaux (cm)	4	
Efficacité de plan de grille (%)	0	
<b>Caractéristiques des turbines</b>		
	<b>Turbine n°1</b>	<b>Turbine n°2</b>
Type de turbine	Kaplan	Kaplan
Hauteur de chute (m)	3,6 m	3,6 m
Débit turbiné (m <sup>3</sup> /s)	7	3
Nombre de pales	4	4
Diamètre de la roue (m)	1,45	0,8
Vitesse de rotation (tours/min)	196	212
Proportion de débit turbiné (%)	70	30

#### **4.6.1. Etape 1 : Proportions d'individus dévalants par les ouvrages évacuateurs de crue et entraînés dans la prise d'eau**

##### **4.6.1.1. Phase 1 : Période globale de dévalaison et débits déclenchant les épisodes de dévalaison**

Dans ce secteur, la période de dévalaison de l'anguille s'étend d'octobre à janvier. Elle a été déterminée grâce à différentes études réalisées sur le bassin. Dans ce bassin, il a également été déterminé par des suivis piscicoles que 20% des individus dévalent à un débit voisin du 3<sup>ème</sup> quartile (Q<sub>75</sub>), 20% au 90<sup>ème</sup> centile (Q<sub>90</sub>), 20% au 95<sup>ème</sup> centile (Q<sub>95</sub>), 20% au 97,5<sup>ème</sup> centile (Q<sub>97.5</sub>) et 20% au 99<sup>ème</sup> centile (Q<sub>99</sub>).

##### **4.6.1.2. Phase 2 : Calcul des débits journaliers au droit de l'aménagement**

Afin de produire une courbe de débits classés et d'estimer les débits d'intérêt (Q<sub>75</sub>, Q<sub>90</sub>, Q<sub>95</sub>, Q<sub>97.5</sub> et Q<sub>99</sub>) lors de la période de dévalaison de l'anguille sur le secteur considéré (d'octobre à janvier), en l'absence de données hydrologiques à l'amont immédiat de l'aménagement, les valeurs de débits moyens journaliers de la station hydrométrique la plus proche ont été récoltées. Les débits moyens journaliers au droit de l'ouvrage ont ensuite été estimés à partir de ces données en effectuant une correction au prorata de la surface de bassin versant (voir paragraphe 4.1.2).

Dans cet exemple, les superficies de bassin versant au niveau de l'aménagement et de la station hydrométrique sont respectivement de 1206 km<sup>2</sup> et 1120 km<sup>2</sup>. La formule suivante a donc été utilisée pour recalculer les débits journaliers au droit de l'aménagement :

$$Q_{TOT} = Q_s \times (1206 / 1120)^{0,8}$$

où :

- Q<sub>TOT</sub> : débit en amont immédiat de l'aménagement (m<sup>3</sup>/s)
- Q<sub>s</sub> : débit au niveau de la station hydrométrique utilisée (m<sup>3</sup>/s)

Les débits classés d'intérêt ont ainsi pu être estimés pour chaque année pour lesquelles les données hydrologiques étaient disponibles (Tableau 5).

**Tableau 5.** Valeurs de débit classés (m<sup>3</sup>/s) au niveau de l'aménagement étudié, pendant la période de dévalaison de l'anguille (octobre à janvier).

Années	Fréquences de non dépassement				
	0,99	0,975	0,95	0,90	0,75
2008/2009	76,7	73,4	60,0	48,1	37,6
2009/2010	124,0	88,3	82,8	67,0	50,1
2010/2011	77,4	61,5	53,3	43,9	38,6
2011/2012	138,2	97,6	70,9	47,7	35,8
2012/2013	63,8	61,4	58,6	54,6	50,1
2013/2014	168,4	159,0	141,0	105,1	66,5
2014/2015	86,4	79,1	61,9	51,8	38,7
2015/2016	96,5	74,6	53,9	45,7	36,2
2016/2017	89,7	76,1	55,1	47,8	37,5
2017/2018	112,4	95,4	75,0	63,2	45,0
2018/2019	50,3	47,7	39,9	30,1	20,2

#### 4.6.1.3. Phases 3 et 4 : Estimation de la part de débit déversée au niveau du seuil et des proportions d'individus empruntant les différentes voies de passage

Pour cet exemple, la formule proposée par Bau *et al.*, (2013) a été utilisée afin d'évaluer la probabilité de passage par les ouvrages évacuateurs :

$$P = \exp(\eta) / (1 + \exp(\eta))$$

$$\text{avec : } \eta = - 3,94 + 7,29 * (Q_{\text{DEV}} / Q_{\text{TOT}})$$

où :

- P : probabilité de passage des poissons au niveau des ouvrages évacuateurs
- Q<sub>DEV</sub> : débit déversé au niveau des ouvrages évacuateurs (m<sup>3</sup>/s)
- Q<sub>TOT</sub> : débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement (m<sup>3</sup>/s)

Le débit déversé (Q<sub>DEV</sub>) correspond à la part du débit total (Q<sub>TOT</sub>) qui n'est pas turbiné (voir paragraphe 4.1.4).

Dans cet exemple, l'aménagement ne restitue pas directement l'eau détournée au pied du seuil et crée un tronçon court-circuité de 1000 m (Tableau 4). Un débit réservé de 10 m<sup>3</sup>/s (valeur minimale) doit être déversé au niveau du seuil. Le débit turbiné maximal étant de 10 m<sup>3</sup>/s, le débit total à l'amont de l'aménagement doit donc être supérieur à 20 m<sup>3</sup>/s pour permettre à la centrale de turbiner au maximum de ses possibilités, ce qui est le cas dans notre exemple pour tous les débits classés d'intérêt (voir tableau 5). Lors de tous les épisodes présumés de dévalaison de l'anguille au niveau de cet aménagement, la formule suivante peut donc être appliquée :

$$Q_{DEV} = Q_{TOT} - Q_{TUR}$$

où :

- $Q_{DEV}$  : débit déversé au barrage ( $m^3/s$ )
- $Q_{TOT}$  : débit du cours d'eau à l'amont immédiat de l'aménagement ( $m^3/s$ )
- $Q_{TUR}$  : débit turbiné ( $m^3/s$ )

Une probabilité de passage des anguilles par les ouvrages évacuateurs peut alors être calculée pour chaque débit d'intérêt et chaque année (Tableau 6). En considérant qu'une même proportion d'anguilles, soit 20%, dévale à chacun des débits étudiés, une moyenne de la probabilité de passage peut facilement être déterminée pour chaque année en faisant la moyenne des probabilités de passage à chacun des débits d'intérêt (Tableau 6).

**Tableau 6.** Probabilité de passage des anguilles par les ouvrages évacuateurs de l'aménagement étudié, pour différentes années et à différents débits d'intérêt ( $Q_{75}$  à  $Q_{99}$ ).

Années	Débits classés					Moyenne	Probabilité de dévalaison dans la part de débit turbinée
	$Q_{99}$	$Q_{97,5}$	$Q_{95}$	$Q_{90}$	$Q_{75}$		
2008/2009	0,92	0,92	0,91	0,88	0,84	0,89	0,11
2009/2010	0,94	0,93	0,93	0,91	0,89	0,92	0,08
2010/2011	0,92	0,91	0,90	0,87	0,85	0,89	0,11
2011/2012	0,94	0,93	0,92	0,88	0,83	0,90	0,10
2012/2013	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,90	0,10
2013/2014	0,95	0,95	0,94	0,94	0,91	0,94	0,06
2014/2015	0,93	0,92	0,91	0,89	0,85	0,90	0,10
2015/2016	0,93	0,92	0,90	0,88	0,84	0,89	0,11
2016/2017	0,93	0,92	0,90	0,88	0,84	0,90	0,10
2017/2018	0,94	0,93	0,92	0,91	0,87	0,91	0,09
2018/2019	0,89	0,88	0,86	0,79	0,59	0,80	0,20

Cet exemple illustre que, pour les anguilles, la probabilité de passage par les ouvrages évacuateurs est plus importante lors des années à hydrologie forte (cf. Tableaux 5 et 6). La probabilité de passage dans la part de débit turbiné varie ici du simple au triple en fonction de l'hydrologie sur la période de dévalaison.

#### 4.6.2. Etape 2 : Taux de mortalité au niveau de l'ouvrage évacuateur

Pour cet exemple, il n'y avait pas d'information à disposition sur les conditions de chute et de réception des poissons lorsqu'ils franchissent l'aménagement par l'ouvrage évacuateur. La mortalité des poissons a été considérée nulle.

### 4.6.3. Etape 3 : Efficacité du plan de grille

Du fait d'un espacement libre entre les barreaux de 4 cm (Tableau 4), l'efficacité du plan de grille a été considérée comme nulle. De ce fait, il est considéré que toutes les anguilles dévalant dans la part de débit turbiné passeront dans les turbines.

### 4.6.4. Etape 4 : Calcul du taux de mortalité dans les turbines

La centrale considérée étant équipée de turbines de type Kaplan, les mortalités sont estimées en utilisant les caractéristiques présentées dans le Tableau 4 et en faisant la moyenne des résultats obtenus par les trois formules de Gomes & Larinier (2008), présentées dans le paragraphe 4.4.3.

Les tailles des anguilles dévalantes au niveau de cet aménagement n'étant pas connues, l'estimation de mortalité a été réalisée pour 3 longueurs, représentatives des longueurs d'individus dévalants : 50, 70 et 90 cm (Tableau 7).

**Tableau 7.** Taux de mortalité induit par les deux turbines de l'aménagement étudié, pour des anguilles de 50, 70 et 90 cm. Les types de formules sont issus de Gomes et Larinier (2008) (voir paragraphe 4.4.3).

Type de formule	Turbine n°1			Turbine n°2		
	Taille des anguilles (m)					
	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
M1 (%)	32	54	79	45	75	100
M2 (%)	37	64	97	48	83	100
M3 (%)	40	64	90	54	85	100
Moyenne (%)	37	61	88	49	81	100

Sachant que la turbine n°1 représente 70% du débit turbiné (contre 30% pour la turbine n°2) et que l'on considère que la quantité de poissons qui passe dans chaque turbine est proportionnelle à la part de débit turbiné par chacune des turbines, les mortalités moyennes induites par les turbines au niveau de cet aménagement peuvent facilement être calculées (Tableau 8). Par exemple, pour des anguilles de 50 cm, cette mortalité moyenne sera de :  $(37 \times 0.7) + (49 \times 0.3) = 40.6\%$ .

**Tableau 8.** Taux de mortalité moyen d'anguilles de différentes tailles transitant par les turbines de l'aménagement étudié.

Taux de mortalité moyen (%)	Taille des anguilles (m)		
	0,5	0,7	0,9
	40,6	67,0	91,6

#### 4.6.5. Etape 5 : Estimation de la mortalité totale à l'échelle de l'aménagement

Etant donné que l'on considère :

- qu'il n'y a aucune mortalité au niveau des ouvrages évacuateurs ;
- que, par définition, les anguilles qui n'empruntent pas les ouvrages évacuateurs dévalent dans la part de débit qui est turbinée ;
- que le plan de grille ne présente aucune efficacité et que toutes les anguilles dévalant dans la part de débit turbinée passeront dans les turbines ;

le taux de mortalité à l'échelle de cet aménagement (Tableau 9) a été estimé à partir du taux de mortalité engendré par les turbines (Tableau 8), appliqué à la proportion d'individus dévalants dans la part de débit turbinée (Tableau 6).

**Tableau 9.** Estimation de la variabilité interannuelle du taux de mortalité moyen à l'échelle de l'aménagement étudié, pour des anguilles de différentes tailles.

Années	Taille des anguilles (m)		
	0,5	0,7	0,9
2008/2009	4%	7%	10%
2009/2010	3%	5%	7%
2010/2011	4%	7%	10%
2011/2012	4%	7%	9%
2012/2013	4%	7%	9%
2013/2014	2%	4%	5%
2014/2015	4%	7%	9%
2015/2016	4%	7%	10%
2016/2017	4%	7%	9%
2017/2018	4%	6%	8%
2018/2019	8%	13%	18%
Moyenne	4%	7%	10%

#### 4.7. Mortalité à l'échelle d'un axe ou d'un territoire

Si l'estimation d'un taux de mortalité à l'échelle d'un aménagement hydroélectrique peut être intéressante pour en quantifier l'impact relatif, cette échelle de travail est insuffisante pour des **perspectives de gestion piscicole à large échelle** et, *a fortiori*, de conservation d'une espèce en danger d'extinction. Il est alors plus judicieux de **réaliser ce diagnostic de mortalité à l'échelle d'un axe de migration, voire d'un bassin versant**, pour proposer des solutions de réduction d'impacts intégrées et cohérentes, bien priorisées entre les sites et dans le temps.

Par exemple, les aménagements situés en amont des cours d'eau peuvent présenter des mortalités absolues relativement faibles, du fait d'un faible nombre de poissons présents dans ces zones au regard de l'ensemble des individus présents sur le cours d'eau. Cependant, ces zones amont sont les lieux privilégiés de croissance des plus grosses femelles, qui jouent un rôle très important dans le succès de

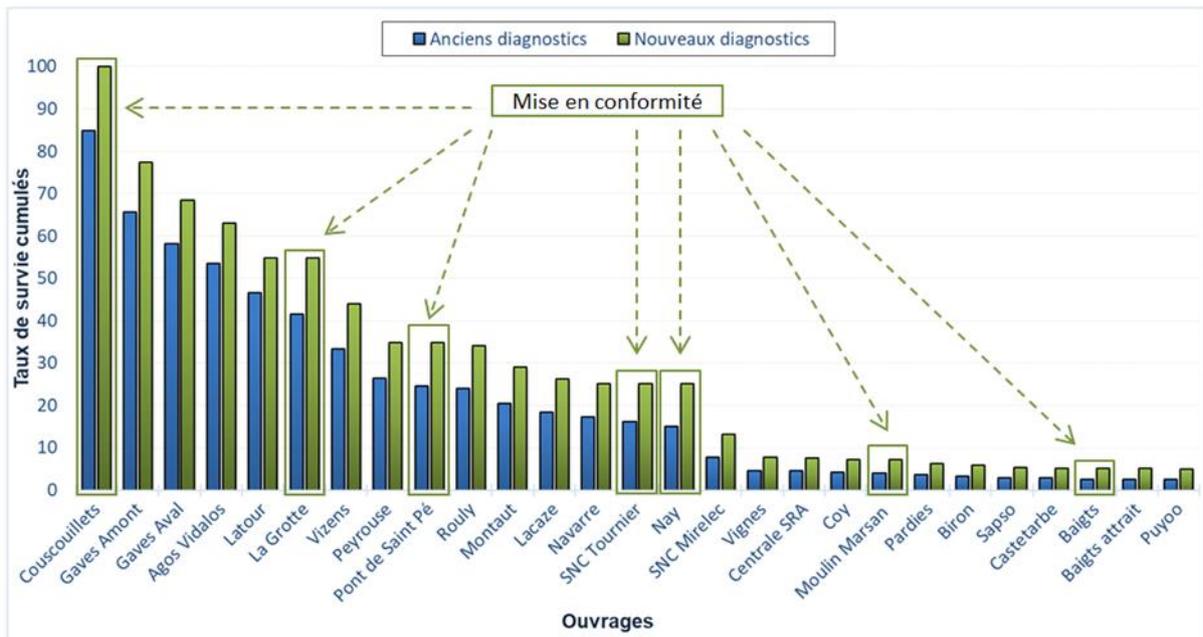
reproduction, étant donné que la quantité d'œufs qu'elles pourront déposer est proportionnelle à leur poids. Cet effet a été notamment pointé par Adam *et al.* (2008) : "*le recrutement futur nous semble ainsi davantage limité par le nombre de femelles se reproduisant que par le nombre de mâles, même si ces derniers sont indispensables pour la fécondation*", ainsi que par le Ministère français en charge de l'environnement dans un rapport de mise en œuvre du plan de gestion de l'anguille (France, 2015) : "*si les densités diminuent en fonction de la distance à la mer, la prise en compte du gradient de sex-ratio montre que ce sont principalement les gros individus qui sont impactés en amont des bassins. Ces individus correspondent aux femelles à fort potentiel reproducteur.*" Ainsi, **un fort taux de mortalité pour un aménagement amont, même s'il ne s'applique qu'à un faible nombre d'individus, pourra avoir un impact important sur la quantité d'anguilles produites à la génération suivante. Il est donc important d'évaluer les impacts des aménagements sur la biomasse, voire sur le nombre d'œufs produits *in fine*, et pas seulement sur le nombre d'individus** (voir par exemple CEREMA, 2016).

Par ailleurs, les femelles qui migrent depuis les zones amont en direction du milieu marin vont devoir potentiellement franchir un grand nombre d'aménagements pendant leur migration. Si l'on veut leur laisser une chance significative de rejoindre leur lieu de reproduction, il faut mettre en place des **actions de réduction des impacts** (i.e. de réduction de mortalité dans le cas présent) **sur l'ensemble des aménagements** présents sur le cours d'eau. En effet, sur un ensemble d'aménagements successifs, il suffit qu'un seul présente un taux de mortalité élevé pour compromettre les efforts de réduction d'impacts qui pourraient être faits sur les autres et pour que le taux d'échappement global des poissons à l'échelle de l'axe de migration reste faible.

Ainsi, la mise en œuvre de solutions<sup>19</sup> sur une proportion restreinte des ouvrages présents sur un axe ne permet généralement pas de régler efficacement les problèmes de mortalité rencontrés lors de la dévalaison. Cela peut être illustré par la Figure 30, qui présente l'évolution des taux de survie cumulés estimés des anguilles dévalantes sur le Gave de Pau, cours d'eau qui compte 27 aménagements hydroélectriques devant être franchis par certaines anguilles. Cet exemple illustre tout d'abord l'impact considérable, en termes des mortalités cumulées, que peut présenter une succession de centrales hydroélectriques sur des poissons dévalant depuis les zones amont. Ainsi, le taux de survie estimé n'est plus que d'une 30<sup>aine</sup> de % après franchissement de huit aménagements. De plus, il met en évidence que la mise en conformité de certains ouvrages seulement (mise en place de plans de grilles ichtyocompatibles sur 7 des 27 aménagements dans le cas présenté) ne diminue pas drastiquement le taux de mortalité global à l'échelle de l'axe de migration. Dans cet exemple (Figure 30), la probabilité de survie d'une anguille dévalant depuis l'amont passe de 2% à 5%, après la mise en place des meilleures solutions pour limiter la mortalité (on estime en effet ici que les prises d'eau ichtyocompatibles mises en place sur les 7 aménagements concernés permettent de préserver 100% des anguilles dévalantes de plus de 70 cm).

---

<sup>19</sup> En France, on parle parfois de "mise en conformité" : action de rendre une installation conforme à la réglementation en vigueur (cf. notamment l'Article L214-17 du Code de l'Environnement en France). Il s'agit plus particulièrement ici, sur les tronçons de cours d'eau présentant un enjeu "anguille", de gérer ou d'équiper un ouvrage afin de permettre les déplacements de cette espèce.



**Figure 30.** Taux de survie cumulés estimés pour des anguilles dévalant de l'amont de l'aménagement des Couscouilllets (à gauche de la figure), vers l'aval (à droite) du Gave de Pau (les résultats sont donnés ici pour des anguilles de 70 cm). Les anciens diagnostics (en bleu) ont été établis avant la mise en place de prises d'eau "ichthyocompatibles" sur les ouvrages encadrés en vert. Les derniers diagnostics (en vert), tiennent compte de cette mise en conformité, demandée par la loi française. Figure extraite du livrable 2.2.2 de SUDOANG.

Lorsqu'un enjeu "anguille" (et de manière plus générale, un enjeu "espèces migratrices amphihaline") est présent à l'échelle d'un axe, il semble donc important et judicieux de raisonner à une large échelle géographique, en **limitant au maximum les impacts de chaque ouvrage**, plutôt que de raisonner ouvrage par ouvrage.

Enfin, n'oublions pas que les solutions proposées ici permettent seulement de réduire la mortalité des anguilles dévalantes au travers des turbines, mais qu'elles **ne règlent en rien les autres problèmes de continuité écologique potentiellement posés par les aménagements** : blocage ou retard pour les poissons qui remontent le cours d'eau, modification des habitats et du transport sédimentaire par la création d'une retenue, mortalité d'autres espèces lors de leur passage dans les turbines, mortalité des anguilles jaunes (plus petites et donc potentiellement mal arrêtées par des grilles) qui peuvent aussi se déplacer...

## Bibliographie

- Acou A., 1999.** L'anguille européenne, dynamique et déterminisme de la migration catadrome dans un bassin versant anthropisé de Bretagne (Frémur). Diplôme doctoral de l'Université de Rennes 1, 167 p.
- Acou A., Boisneau C. & Feunteun E., 2009.** Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : état des connaissances et développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, CRESCO, Dinard, 96 p. + annexes.
- Adam B., 2000.** MigromatTM: ein Frühwarnsystem zur Erkennung der Aalabwanderung. *Wasser Boden* 52(4): 16-19.
- Adam G., Feunteun E., Prouzet P. & Rigaud C., 2008.** L'anguille européenne - indicateurs d'abondance et de colonisation. Editions Quae, Versailles, 393 p.
- Andréassian V., Lerat J., Le Moine N. & Perrin C., 2012.** Neighbors: nature's own hydrological models, *Journal of Hydrology*, 414/415: 49-58.
- Baran P. & Basilio L., 2012.** Plan de sauvegarde de l'anguille - Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages ? Séminaire de restitution du programme R&D Anguilles-Ouvrages, 28 et 29 novembre 2011, Paris. Collection "Les rencontres de l'Onema", Paris, 156 p.
- Baran P. & Courret D., 2013.** Ichtyocompatibilité de turbines hydroélectriques : définition des attentes et des protocoles de tests nécessaires. Rapport Pôle Ecohydraulique Onema-Irstea-IMFT, 15 p.
- Bau F., Gomes P., Alric A., Baran P., Larinier M., Travade F., De Oliveira E., Frey A. & Mennessier J-M., 2010.** Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Sapso, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2008-2009). Rapport Onema-EDF, Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 103 p. + annexes.
- Bau F., Gomes P., Baran P., Drouineau H., Larinier M., Alric A., Travade F. & De Oliveira E., 2013.** Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Sapso, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2010). Rapport de synthèse. Rapport Onema-EDF, Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 62 p. + annexes.
- Bau F., Gomes P., Lafitte J., Alric A., Baran P., Larinier M., Travade F. & De Oliveira E., 2011.** Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques de Biron, Sapso, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2009-2010). Rapport Onema-EDF, Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 99 p. + annexes.
- Baudoin J-M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P. & Voegtli B., 2014.** Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Collection "Comprendre pour agir", Onema, Paris, 200 p.
- Berg R., 1986.** Fish passage through Kaplan turbines at a power plant on the river Neckar and subsequent eel injuries. *Vie milieu*, 36: 307-310.

- Bosc S. & Larinier M., 2000.** Définition d'une stratégie de réouverture de la Garonne et de l'Ariège à la dévalaison des salmonidés grands migrateurs. Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison. Rapport GHAAPPE RA00.01, 53 pp.
- Briand C., Chapon P-M., Beaulaton L., Drouineau H. & Lambert P., 2018.** Eel density analysis (EDA 2.2.1) Escapement of silver eels (*Anguilla anguilla*) from French rivers. Rapport EPTB Vilaine-AFB-INRA-IRSTEA, 97 p.
- Brujjs M.C.M., Polman H.J.G., Van Aerssen G.H.F.M., Hadderingh R.H., Winter H.V., Deerenberg C., Jansen H.M., Schwevers U., Adam B., Dumont U. & Kessels N., 2003.** Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse. EU-Report, Contract Q5RS-2000-31141, KEMA Nederland B.V., Arnhem, the Netherlands, 106 p.
- Cada G.F., 2001.** The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, 26: 14-23.
- Calles O., 2016.** The performance of upstream and downstream passage facilities for diadromous fish species. Fish Market Conference, International workshop on downstream fish passage best practices and innovations at hydropower stations, 6-7 October, Roermond, the Netherlands.
- CEREMA, 2016.** Impact à la dévalaison de l'anguille des centrales hydroélectriques de grande capacité de l'aval de la Seine. Rapport de synthèse, Cerema Normandie-Centre, 52 p. + annexes.
- Comité Scientifique de Tuilières, 2016.** Note sur les modalités et sur l'évaluation de l'efficacité des arrêts de turbinage à Tuilières vis-à-vis de la dévalaison des anguilles. Note technique, 18 p.
- Courret D. & Larinier M., 2008.** Guide pour la conception de prises d'eau ichtyocompatibles pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.08.09, 60 p. + annexes.
- Courret D., Larinier M., David L. & Chatellier L., 2015.** Development of criteria for the design and dimensioning of fish-friendly intakes for small hydropower plant. Fish Passage Conference, International conference on river connectivity best practices and innovations, June 22-24, Groningen, the Netherlands.
- De Oliveira E., Tétard S., Schmidt M., Langkau M., Frey A. & Lagarrigue T., 2015.** Utilisation d'une caméra acoustique pour le suivi de la dynamique de dévalaison des anguilles argentées en Dordogne. Présentation EDF-ECOGEA-LFV, rencontres "anguille" du GRISAM, 18 novembre, Boulogne-sur-mer, France.
- Drouineau H., Bau F., Alric A., Deline N., Gomes P. & Sagnes P., 2017.** Silver eel downstream migration in fragmented rivers: use of a Bayesian model to track movements triggering and duration. *Aquatic Living Resources*, 30: 5.
- DWA, 2005.** Fish protection technologies and downstream fishways - Dimensioning, design, effectiveness inspection. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Germany, 226 p.
- Ebel G., 2013.** Fishschutz und fischabstieg an wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Halle, Germany, 483 p.

- ECOGEA, 2011.** Tests d'évaluation des dommages subis par des anguilles à la dévalaison lors de leur transit à travers le nouveau groupe turbogénérateur VLH à manteau de roue sphérique installé sur la Moselle à Frouard (54) - Tests d'octobre 2010 sur des anguilles jaunes et argentées. Rapport pour MJ2 technologies, 26 p. + annexes.
- ECOGEA, 2013.** Tests for evaluating damage to fish species migrating downstream during their transit through the VLH hydraulic turbine installed on the Tarn River in Millau – Report on tests run in May and June 2013. Rapport d'étude, 23 p.
- ECOGEA, 2014.** Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des anguilles. Bassin du gave d'Oloron (Hors Saison). Rapport ECOGEA E111113.02 pour la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Pyrénées Atlantiques, 90 p. + annexes.
- Environment Agency, 2005.** Screening for Intake and Outfalls: a best practice guide. Science Report SC030231, Environment Agency, Bristol, UK, 154 p.
- Environment Agency, 2012.** Hydropower Good Practice Guidelines. Screening requirements. Environment Agency, Bristol, UK, 16 p.
- Euzenat G., Fournel F., Fagard J-L. & Larinier M., 2011.** L'Anguille sur la Bresle. Dévalaison et environnement. Application à l'hydroélectricité. ONEMA, Séminaire de restitution du programme R&D Anguilles-Ouvrages, 28 et 29 novembre 2011, Paris.
- F CPPMA14, 2014a.** Suivi des populations de poissons migrateurs au niveau de la station de contrôle de Feugeurolles-Bully - Année 2014. Rapport de la Fédération du Calvados pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, 39 p. + annexes.
- F CPPMA14, 2014b.** Suivi des populations de poissons migrateurs au niveau de la station de contrôle de Breuil-en-Auge - Année 2014. Rapport de la Fédération du Calvados pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, 22 p. + annexes.
- Feunteun E., 2002.** Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): an impossible bargain. *Ecological Engineering*, 18: 575-591.
- Fishtek, 2007.** Fish Monitoring and Live Fish Trials - Archimedes Screw Turbine, River Dart. Phase 1 Report: Live fish trials, smolts, leading edge assessment, disorientation study, outflow monitoring. FISHTEK consulting, 38 p. + annexes.
- Fishtek, 2008.** Archimedes Screw Turbine Fisheries Assessment. Phase II: Eels and Kelts. FISHTEK consulting, 18 p. + annexes.
- Fishtek, 2009.** Howsham Fish Monitoring. Assessment of fish passage through the Archimedes Turbine and associated by-wash. FISHTEK consulting, 16 p. + annexes.
- France, 2015.** Plan de gestion anguille de la France - Rapport de mise en œuvre - Juin 2015. Article 9 du R (CE) n°1100/2007, 124 p.
- Gomes P. & Larinier M., 2008.** Étude sur la mortalité des anguilles suite à leur passage au travers des turbines Kaplan – Établissement de formules prédictives. Rapport GHAPPE RA.08.01, 38 p. + annexes.

- Gosset C., Travade F., Durif C., Rives J. & Garaicoechea C., 2000.** Étude des dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée. Test de deux exutoires de dévalaison à la centrale hydroélectrique de Halsou (Nive-64). Rapport INRA-EDF, 37 p. + annexes.
- Gosset C., Travade F., Durif C., Rives J., Garaicoechea C. & Elie P., 2002.** Étude des dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée - Test de deux exutoires de dévalaison à la centrale hydroélectrique d'Halsou (Nive - 64). Rapport INRA-EDF, 46 p. + annexes.
- Gosset C., Travade F., Durif C., Rives J., Garaicoechea C., Guibert A. & Elie P., 2001.** Étude des dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée. Test de deux exutoires de dévalaison à la centrale hydroélectrique de Halsou (Nive-64). Rapport INRA-EDF, 46 p. + annexes.
- Guensch G.R., Mueller R.P., McKinstry C.A. & Dauble D.D., 2002.** Evaluation of fish injury mechanism during exposure to a high-velocity jet. Report of the Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA, 31 p. + annexes.
- Hefti D., 2012.** Migration du poisson vers l'amont et vers l'aval à la hauteur des ouvrages hydroélectriques - Check-list Best practice. Office fédéral de l'environnement, Berne, Suisse, "Connaissance de l'environnement" n°1210, 81 p.
- Holzner M., 1999.** Untersuchungen zur Vermeidung von Fischschäden im Kraftwerksbereich dargestellt am Kraftwerk Dettelbach am Main/Unterfranken. Landesfischereiverband Bayern, 224 p.
- ICES, 2007.** Report of the 2007 Session of the Joint EIFAC/ICES, Working Group on Eels, FAO European Inland Exploration of the Sea, Bordeaux, 3-7 September, 108 p. + annexes.
- ICES, 2019.** European eel (*Anguilla anguilla*) throughout its natural range. In Report of the ICES Advisory Committee, 2019. ICES Advice 2019, ele.2737.nea, 16 p.
- Kroll L., 2015.** Eel protection Initiative (EPI) Rhineland-palatinate/ RWE Power AG on the Moselle river with special reference to "catch & carry" methods. Session C4, International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage, Groningen, The Netherlands, 22-24 June.
- Larinier M. & Dartiguelongue J., 1989.** La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 312-313: 1-90.
- Larinier M. & Travade F., 2002.** Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364: 181-207.
- Lasne É., Acou A., Vila-Gispert A. & Laffaille P., 2008.** European eel distribution and body condition in a river floodplain: effect of longitudinal and lateral connectivity. *Ecology of Freshwater Fish*, 17: 567-576.
- Lebecherel L., Andréassian V., Augeard B., Sauquet E. & Catalogne C., 2015.** Connaitre les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? Collection "Comprendre pour agir", Onema-MEDDE-Irstea, 28 p.
- Lemkecher F., Chatellier L., Courret D. & David L., accepted.** Experimental study of fish-friendly angled trash racks with horizontal bars. *Journal of Hydraulic Research*.

- Limburg K.E. & Waldman J.R., 2009.** Dramatic declines in North Atlantic diadromous fishes. *BioScience*, 59: 955-965.
- MacNamara R. & McCarthy T.K., 2011.** Test du MIGROMAT®, biomoniteur de prédiction des périodes de dévalaison de l'anguille argentée. Rapport Ryan Institute and School of Natural Sciences, National University of Ireland, Galway.
- MacNamara R. & McCarthy T.K., 2013.** Silver eel (*Anguilla anguilla*) population dynamics and production in the River Shannon, Ireland. *Ecology of Freshwater Fish*, 23: 181-192.
- McCarthy T.K., Frankiewicz P., Cullen P., Blaszkowski M., O'Connor W. & Doherty D., 2008.** Long-term effects of hydropower installations and associated river regulation on River Shannon eel populations: mitigation and management. *Hydrobiologia*, 609: 109-124.
- Merkx J.C.A. & Vriese F.T., 2007.** Monitoring vijzel en vispassage Hooidonkse molen. VisAdvies BV, Utrecht, Projectnummer VA2006\_41, 18 p.
- Odeh M., 1999.** A summary of environmentally friendly turbine design concepts. Report DOE/ID - 13741, U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office, 39 p.
- Pike C., Crook V. & Gollock M., 2020.** *Anguilla anguilla*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2020*: e.T60344A152845178. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T60344A152845178.en>
- Piper A.T., Rosewarne P.J., Wright R.M. & Kemp P.S., 2020.** Using "trap and transport" to facilitate seaward migration of landlocked European eel (*Anguilla anguilla*) from lakes and reservoirs. *Fisheries Research*, 228: 105567, 8 p.
- Rainey W.S., 1985.** Considerations in the design of juvenile bypass systems. Aurora, Colorado, USA: Proceedings of the Symposium on Small Hydropower and Fisheries, May 1-3, 261-268.
- Raynal S., Chatellier L., Courret D., Larinier M. et David L., 2014.** Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks. *Journal of Hydraulic Research*, 52: 426-431.
- Sandberg S., 2018.** Krafttag ål 2015-2017. Rapport Energiforsk 2018:504, 26 p.
- Schwevers U. & Adam B., 2019.** Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer Nature Switzerland, Cham, 279 p.
- Späh H., 2001.** Expertise biologique piscicole. Convivialité vis-à-vis des poissons de la vis hydrodynamique protégée par brevet de la société RITZ-ATRO Pumpwerksbau GmbH. Rapport, 16 p.
- Subra S., Gomes P., Vighetti S., Larinier M., Thellier P. & Travade F., 2005.** Etude de dispositif de dévalaison pour l'anguille argentée - Comportement de l'anguille et test d'un dispositif de dévalaison à l'usine hydroélectrique de Baigts de Béarn (Gave de Pau). Rapport EDF HP-76/05/025/A. Rapport GHAAPPE RA-05-03, 87 p. + annexes.
- Subra S., Gomes P., Vighetti S., Thellier P., Larinier M., De Oliveira E. & Travade F., 2006.** Étude de dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée. Expérimentation de dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée sur les ouvrages hydroélectriques de Castetarbe et Baigts de Béarn (gave de Pau-64). Campagne 2005-2006. Rapport EDF R&D-GHAAPPE-Migradour H-P76-2006-03437-FR, 108 p. + annexes.

- Szabo-Mezzaros M., Navaratnam C.U., Aberle J., Silva A.T., Forseth T., Calles O., Fjeldstad H-S. & Alfredsen K., 2018.** Experimental hydraulics on fish-friendly trash-racks: an ecological approach. *Ecological Engineering*, 113: 11– 20.
- Teichert N., Tétard S., Trancart T., De Oliveira E., Acou A., Carpentier A., Bourillon B & Feunteun E., 2020b.** Towards transferability in fish migration models: a generic operational tool for predicting silver eel migration in rivers. *Science of the Total Environment*, 739, 140069, 9 p.
- Teichert N., Tétard S., Trancart T., Feunteun E., Acou A. & De Oliveira E., 2020a.** Resolving the trade-off between silver eel escapement and hydropower generation with simple decision rules for turbine shutdown. *Journal of Environmental Management*, 261, 110212, 9 p.
- Tomanova S., Courret D., Mercier O., Richard S., De Oliveira E., Mataix V., Lagarrigue T., Frey A. & Tétard S., 2019.** Efficiency of downstream passage devices to protect migrating silver eels assessed with radiotelemetry. 5th International Conference on Fish Telemetry, Arendal, Norway, June 24th-28th.
- Trancart T., Carpentier A., Acou A., Charrier F., Mazel V., Danet V. & Feunteun E., 2020.** When "safe" dams kill: analyzing combination of impacts of overflow dams on the migration of silver eels. *Ecological Engineering*, 145: 105741, 11 p.
- Travade F., Larinier M., Subra S., Gomes P. & De Oliveira E., 2009.** Franchissement des aménagements hydroélectriques par l'anguille argentée en dévalaison. Étude des voies de franchissement de l'usine hydroélectrique de Baigts de Béarn (64). Test d'exutoires de dévalaison et de grilles fines. Rapport EDF R&D H-P 76-2009-02948-FR, GHAAPPE RA09.05, 59 p. + annexes.
- USBR, 2006.** Fish protection at water diversions: a guide for planning and designing fish exclusion facilities. Water resources technical publication, US Department of the Interior, Denver, USA, 430 p. + annexes.
- U.S. Fish and Wildlife Service, 2017.** Fish Passage Engineering Design Criteria. USFWS, Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts.
- Verdeyroux P. & Guerri O., 2015.** Rivière Index Dronne - Suivi de la dévalaison de l'Anguille. 2014-2015. Quatrième saison de suivi. Rapport EPIDOR, 47 p.

## ANNEXE - R code : mortalité dans les turbines

### 1. Calcul des mortalités pour une taille donnée.

```
#' Calculation of turbines mortality for eel for Kaplan and Francis turbines.
#' For Kaplan Gomes et Larinier, 2008 propose three formulas given mortality
percentage (M) according to eel size
#' size (TL in m), wheel diameter Dr (in m), nominal flow Q (in m3/s) and
turbine rotation speed N (in trn/min) :
#' M1 : M (%) = 4.67 TL1.53 Dr-0.48 N0.6
#' M2 : M (%) = 6.59 TL1.63 Q-0.24 N0.63
#' M3 : M (%) = 12.42 TL1.36 Q-0.22 Dr-0.10 N0.49
#' For Francis, we use the formula developped for salmon by Bosc and Larinier
(2000)
#' M4 : M(%) = 100*sin((pi/180)*pmin(90,-17.98 + 45.62 * H0.181 * Q-0.207
* TL0.224))^2
#' @param Size The fish size in meter : must be unique (not a vector) see
smolt_mortality_all_size to use several size
#' @param Dr Diameter of the wheel, in m
#' @param Q Flow in the turbine in m3 per second
#' @param N Rotation speed in turn per minute
#' @param H height of dam in m
#' @param QND A vector describing whether Q N and D are available. Given data
availabilities, different formulas are used
#' see Gomez and Larinier, 2008
#' @param typ PARAM_DESCRIPTION, Default: c("Kaplan", "Francis", "Pelton",
"Ichtyocompatible")
#' @return A vector of mortalities
#' @examples
#' \dontrun{
#' if(interactive()){
#eel_mortality_size(Dr=1.78,Q=8,N=117,H=3,QND="QND",size=0.70, typ="Francis")
#21.49
#eel_mortality_size(Dr=1.3,Q=5.2,N=205,H=3,QND="QND",size=0.70, typ="Kaplan")
#70.35
#' }
#' }
#' @rdname eel_mortality_size
#' @export
eel_mortality_size<-function(
  Dr,
  Q,
  N,
  H,
  QND,
  size,
  typ=c("Kaplan","Francis","Pelton","Ichtyocompatible"))
{
  # --- initial tests -----
  typ[is.na(typ)]<-"NA"
  if (! all(typ%in%c("Kaplan","Francis","Pelton","Ichtyocompatible")))
    warning(sprintf("typ %s not processed, should be one of 'Kaplan',
'Francis', 'Pelton', 'Ichtyocompatible'",
                    unique(
typ[!typ%in%c("Kaplan","Francis","Pelton","Ichtyocompatible")])))
  QND[is.na(QND)]<-"NA"
  if (! all(QND%in%c("QND","QN","ND")))
```

```

        warning(sprintf("QND %s not processed, should be one of
'QND', 'QN', 'ND'",

unique(QND[!QND%in%c("QND","QN","ND")]))
if (size>1) warning("Size >1 : size should be provided in meter")
# --- Check types -----
M <- rep(NA,length(typ))
indexk <- typ=="Kaplan" & !is.na(typ)
indexf <- typ=="Francis" & !is.na(typ)
indexp <- typ=="Pelton" & !is.na(typ)
indexi <- typ=="Ichtyocompatible" & !is.na(typ)

# --- Kaplan -----
idxQND = QND=="QND"
idxQN = QND=="QN"
idxND = QND=="ND"
if (sum(indexk&idxQND)>0)
  M[indexk&idxQND]<- pmin(100,12.42*size^1.36*Q[indexk&idxQND]^-
0.22*Dr[indexk&idxQND]^0.10*N[indexk&idxQND]^0.49)
if (sum(indexk&idxQN)>0)
  M[indexk&idxQN] <- pmin(100,6.59*size^1.63*Q[indexk&idxQN]^-
0.24*N[indexk&idxQN]^0.63)
if (sum(indexk&idxND)>0)
  M[indexk&idxND] <- pmin(100,4.67*size^1.53*Dr[indexk&idxND]^-
0.48*N[indexk&idxND]^0.6)
# --- Francis -----
if (sum(indexf)>0)
  M[indexf] =
      100*sin((pi/180)*pmin(90,-17.98 + 45.62 *
H[indexf]^0.181 * Dr[indexf]^0.207 * size^0.224))^2
# --- Pelton -----
if (sum(indexp)>0)
  M[indexp]=100
# --- ichtyocompatible -----
if (sum(indexi)>0)
  M[indexi]=0
return(M)
}

```

## 2. Calcul des mortalités pour une matrice de classes de tailles

```

#' eel mortalities for a matrix of size class and abundance, Applies the
eel_mortality_size to a matrix of size
#'
#' This function takes the matrix of size class and the matrix of size number
(these can vary from one turbine to the next)
#' and return either a vector of the average mortality (weighted by proportion
of the different size) or
#' the matrix of mortality to get the detail of mortality per size
#' @param size_table A table containing the proportion of size per turbine (the
sum of row must be one, if NA a warning will be issued.)
#' @param middle_class A table containing the "average" size to which the
proportion applies, this
#' can be the center of the class or the average value of the class center
derived from the population structure if available

```

```

#' @param return_type One of vector or matrix, if matrix the class will return a
list with the mortality per size class
#' otherwise it will return, Default: c("vector", "matrix")
#' @param ... Other parameters passed to the smolt_mortality_size function
EXCEPT the size
#' @return Either a matrix with size in column and turbine in line or a vector
of mortalities per turbine
#' @author Cédric Briand, Mathilde Labedan
#' #' @examples
#' \dontrun{

#' if(interactive()){
#eel_mortality_allsize(
#       size_table=data.frame(
#         "s0.50"=rep(1/3,3),
#         "s0.70"=rep(1/3,3),
#         "s0.90"=rep(1/3,3)),
#       middle_class = c(0.5,0.7,0.9) ,
#       Dr = c(1.78,1.3,1.5,0,1.5),
#       H = c(3, 3, 4.4,0,5.2),
#       N = c(117,205,122,0,223),
#       Q = c(8,5.2,5.5,0,12),
#       QND=c(NA,"QND",NA,NA,"QND"),
#       typ = c("Francis","Kaplan","Francis","Pelton","Kaplan"),
#       return_type="matrix")
#[,1]      [,2]      [,3]
#[1,] 16.94863 21.49516 25.39744
#[2,] 44.52102 70.35569 99.02292
#[3,] 23.47612 29.11836 33.86979
#[4,] 100.00000 100.00000 100.00000
#[5,] 38.05057 60.13057 84.63145
#' }
#' }
#' @rdname eel_mortality_allsize
#' @export
eel_mortality_allsize <-function(size_table,
middle_class,return_type="vector",...) {
  if (length(return_type)>1) stop("Return type choose one value, vector or
matrix")
  if (!return_type %in% c("vector","matrix")) stop("return_type should be
one of vector or matrix")
  if (ncol(size_table)!=length(middle_class)) stop("the number of column of
size_table and the length of middle_class have to match")
  # apply the smolt mortality size to each size class center
mortality_table<-
mapply(eel_mortality_size,size=middle_class,MoreArgs=list(...))
  if (return_type=="vector"){
    return(round(rowSums(mortality_table*size_table),2))
  } else {
    return(round(mortality_table,2))
  }
}

```