



TABLEAU DE BORD ANGUILE

*du Bassin de la Loire, des Côtiers Vendéens
et de la Sèvre Niortaise*

TURBINES ICTHYOPHILES ET DISPOSITIFS D'ÉVITEMENT POUR LES ANGUILES EN AVALAISON

Potentiel de reproduction

Timothée Besse

Tableau de Bord Anguille du Bassin Loire (LOGRAMI)

Campus Beaulieu, bat 25, ERT Biodiversité Fonctionnelle et Gestion des Territoires - 35 000 Rennes

Avec la participation financière et technique :



SOMMAIRE

1	Les mortalités d’anguilles dévalantes induites par les dispositifs hydroélectriques	3
1.1	Contexte	3
1.2	Les sources de mortalités liées aux turbines hydroélectriques	3
1.3	L’estimation de la mortalité des anguilles en dévalaison	4
2	Des pistes de recherche – l’accord-cadre de recherche et développement sur les ouvrages	6
2.1	Priorités identifiées par le Groupe de Travail « Ouvrages »	6
2.2	Objectifs de l’accord-cadre de R&D.....	6
3	Les dispositifs d’évitement.....	8
3.1	Arrêts de turbinage.....	8
3.2	Prises d’eau ichtyocompatibles	9
3.3	Barrières comportementales.....	10
4	Les turbines ichtyocompatibles	11
4.1	Critères d’évaluation de l’ichtyocompatibilité.....	11
4.2	La turbine VLH	11
4.3	Les autres projets de turbines ichtyocompatibles.....	16
5	Conclusion.....	18
6	Travaux cités	19

1 LES MORTALITES D'ANGUILLES DEVALANTES INDUITES PAR LES DISPOSITIFS HYDROELECTRIQUES

1.1 CONTEXTE

La présence d'ouvrages sur les cours d'eau a de nombreux impacts sur les anguilles argentées en migration de dévalaison. Ils peuvent se traduire par des retards lors du passage dans les retenues à fort temps de séjour, par des mortalités ou des blessures consécutives à l'entraînement dans les prises d'eau, plus particulièrement **lors du transit par les turbines des centrales hydroélectriques**.

Le plan français de gestion de l'anguille, en réponse au règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles¹, fixe comme objectif de réduire l'ensemble des facteurs de mortalité de l'anguille et notamment pour les ouvrages :

-  De **faire porter les efforts sur les premiers ouvrages proches de la mer**, car ce sont ceux dont les effets impactent la plus grande partie des poissons en migration.
-  D'**agir sans attendre sur les nouveaux ouvrages** ou lors de renouvellements.
-  D'**améliorer les connaissances** avant d'engager des mesures pénalisantes pour la production hydroélectrique.

Ce document a pour objet de présenter les différentes solutions de gestion et d'aménagement des ouvrages destinés à réduire l'impact des turbines hydroélectriques sur les anguilles argentées en migration d'avalaison.

1.2 LES SOURCES DE MORTALITES LIEES AUX TURBINES HYDROELECTRIQUES

1.2.1 TECHNOLOGIES DE TURBINES

La classification admise par l'ADEME distingue les centrales de basse chute (moins de 15 mètres), les centrales de moyenne chute (de 15 à 100 mètres), les centrales de haute chute (essentiellement de conduite forcée, plus de 100 mètres).

Les machines sont principalement de trois types :



Figure 1 : Turbine Pelton de la centrale hydroélectrique de Walchensee en Allemagne. Source : Wikipedia.fr

Pour les hautes chutes, de plus de 200 m, les turbines sont de **type Pelton**, avec des roues à augets, un axe vertical ou horizontal, Elles sont équipées d'augets en forme de cuillère qui sont placées autour de la roue et reçoivent l'eau par l'intermédiaire d'un ou plusieurs injecteurs.

¹ Règlement (CE) no 1100/2007 du Conseil du 18 septembre 2007 instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes (Journal Officiel des Communautés européennes du 22/09/2007).

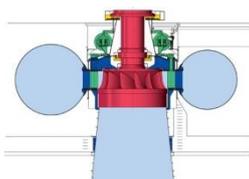


Figure 2 : Schéma de la turbine Francis. Source : Wikipedia.fr © Voith Siemens Hydro Power Generation

Pour les chutes de 30 à 200 voire 300 m, les turbines sont principalement de **type Francis**. Leur vitesse de rotation est rapide (jusqu'à 1 000 tr/min).

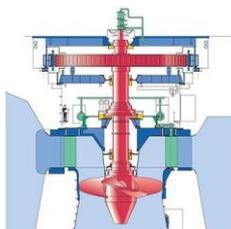


Figure 3 : Schéma de la turbine Kaplan. Source : Wikipedia.fr © Voith Siemens Hydro Power Generation

Les basses chutes sont le plus souvent équipées de turbines Kaplan ou à hélices. Elles sont les plus appropriées pour le turbinage des **faibles chutes** (moins de 10 m) et des **débites importants** (300 à 10 000 l/s).

1.2.2 MORTALITE DIRECTE



Figure 4 : Section simplifiée d'une installation hydroélectrique typique montrant la prise d'eau, la turbine (type Kaplan), les conduites et le flux de sortie. Les poissons entrent dans la turbine et traversent ses composants lors de leur dévalaison.

Le transit par une turbine se traduit par une augmentation importante de la vitesse d'écoulement, ainsi que pour le migrateur, par une probabilité de choc avec une partie fixe ou mobile de la turbine (Baisez, 2005). D'autres effets peuvent encore intervenir, comme les turbulences à l'entrée de la turbine, le piégeage dans les interstices à proximité du manteau de la turbine ou dans les conduites d'eau, l'abrasion due au contact avec des surfaces rugueuses.

L'anguille, compte tenu de sa taille et de son comportement relativement passif lors du passage de l'ouvrage, est un des poissons dévalants les plus exposés aux chocs mécaniques entraînant entaille, fracture, perforation, lacération voire sectionnement complet de l'individu (Baisez, 2005).

1.2.3 MORTALITE INDIRECTE

La mortalité indirecte désigne la mortalité des poissons qui ont subi des niveaux faibles (non létaux) de stress lors du passage d'un ouvrage, mais qui meurent par la suite, à cause de maladies ou de la prédation. La prédation en sortie de turbine est la source la plus importante de mortalité indirecte pour les poissons en migration d'avalaison. Lorsqu'ils ressortent d'une turbine, la désorientation des poissons liée aux turbulences et aux chocs, mais aussi leurs blessures les rendent plus exposés à la prédation (Drummond, 2004). Ces effets n'ont pas été rigoureusement étudiés, **il est donc difficile de déterminer s'il s'agit d'un facteur déterminant de la mortalité des poissons ayant transité au travers des turbines** (Cada, 2001).

1.3 L'ESTIMATION DE LA MORTALITE DES ANGUILES EN DEVALAISON

Les dommages potentiels lors du transit à travers une turbine peuvent être évalués par des expérimentations, qui constituent cependant des opérations très lourdes. Ils peuvent également être approchés sur une installation donnée à partir :

-  De formules prédictives établies à partir d'expérimentations effectuées sur d'autres sites,
-  D'extrapolations de résultats d'expérimentations effectuées sur des turbines de caractéristiques identiques ou tout au moins voisines en termes de diamètre et de chute.

La survie des poissons ayant traversé une turbine dépend largement des caractéristiques de la centrale hydroélectrique (type et taille de la turbine, conditions environnementales, mode opératoire) et de celles du poisson (espèce, taille, conditions physiologiques). Certaines turbines de petite taille, comme celles des installations très en amont (turbines Pelton), causent probablement une mortalité totale. Les turbines installées sur des débits plus larges (turbines Kaplan, Francis) sont liées à des survies généralement supérieures à 70%. Les plus grandes des turbines Kaplan classiques présentent des taux de survie moyens de 88% (Cada, 2001).

Des expérimentations ont été menées dans divers pays (Etats Unis, Canada, Suède, Ecosse, Allemagne, France), principalement sur les juvéniles de salmonidés, mais aussi sur l'anguille, pour évaluer les dommages – en termes de pourcentages de mortalité et de type de blessures – résultant du transit dans les différents types de turbines. Les résultats obtenus sont assez concordants et permettent de tirer certaines conclusions générales sur les dommages potentiels subis par les poissons.

Le règlement européen sur la restauration du stock d'anguilles exige l'évaluation au niveau de chaque bassin des mortalités d'ordre anthropiques, dont celles induites par les aménagements hydroélectriques. Les mortalités estimées sur l'anguille sont de 3 à 5 fois plus importantes que sur les juvéniles de salmonidés, principalement en raison de leur taille. **Elles sont de l'ordre de 10% à 20% sur les turbines les moins dommageables (grosses turbines Kaplan installées sur les usines de basse chute) mais peuvent être beaucoup plus importantes sur les turbines de petit diamètre.**

2 DES PISTES DE RECHERCHE – L'ACCORD-CADRE DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT SUR LES OUVRAGES

2.1 PRIORITES IDENTIFIEES PAR LE GROUPE DE TRAVAIL « OUVRAGES »

Le groupe de travail « ouvrages » réuni pour la définition du règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles a identifié une liste de priorités de recherche et développement concernant les migrations de dévalaison (Anonyme, 2007) :

-  **acquérir une meilleure connaissance du comportement de dévalaison** de l'anguille au niveau des ouvrages
-  **acquérir une meilleure connaissance des rythmes de dévalaison de l'anguille** (facteurs déclenchant et soutenant la migration) en vue de la gestion des aménagements hydroélectriques,
-  **évaluer l'impact des aménagements hydroélectriques** à la dévalaison des anguilles (mortalités dans les turbines et impacts cumulés des aménagements)
-  assurer une veille technologique, le développement et l'évaluation de nouvelles techniques visant à **réduire les mortalités dans les turbines** (barrières comportementales, prises d'eau ichtyocompatibles...)
-  acquérir des techniques de monitoring pour **permettre les tests d'efficacité des dispositifs de franchissement** à la montaison ou de protection lors de l'entraînement dans les prises d'eau.

2.2 OBJECTIFS DE L'ACCORD-CADRE DE R&D

Les priorités de recherche identifiées par le groupe « ouvrages » sont devenues les objectifs d'un **accord-cadre de recherche et développement sur le franchissement des ouvrages par l'anguille européenne**, signé entre l'ONEMA, l'ADEME et les principaux producteurs d'hydroélectricité (ONEMA, 2008).

L'accord-cadre de recherche et développement encadre les études suivantes :

CONNAISSANCE DES COMPORTEMENTS DE DÉVALAISON

-  Modes de franchissement d'obstacles en série sur le Gave de Pau (2007-2009).
-  Modes de franchissement d'obstacles en série sur le Rhin et le Rhône (2009-2010).

PREDICTION DES PICS DE MIGRATION DE L'ANGUILLE

-  Déterminisme de la migration en fonction des paramètres environnementaux (2008).
-  Test du biomoniteur Migromat® sur la Shannon (2008-2009).
-  Mise au point d'un protocole d'échantillonnage pour la détermination des rythmes de dévalaison de l'anguille sur la Dordogne (2008-2012).

VEILLE TECHNOLOGIQUE

-  Définition de prises d'eau ichtyocompatibles (2008-2009), *voir page 9*.
-  Suivi d'un prototype de prise d'eau à Navarrenx (Gave d'Oloron) (2009).
-  Test d'une barrière comportementale à infrasons (2008-2009), *voir page 10*.
-  Optimisation et test de la turbine ichtyophile® VLH (2008), *voir page 13*.
-  Turbines « fish-friendly » ALDEN (2008-2009), *voir page 16*.

IMPACT DES AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES

-  Établissement de formules prédictives de mortalités lors du transit à travers divers types de turbines (2008).
-  Evaluation in situ des mortalités dans certaines turbines de grande taille (2009-2010).
-  Evaluation in situ de mortalité dans certaines turbines de petite taille (2009-2010) : turbines Kaplan fonctionnant sous de très basses chutes.
-  Estimation des mortalités cumulées dans les turbines à l'échelle d'un cours d'eau (2008).

EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT

-  Tester les techniques de comptage et d'évaluation de l'efficacité des passes à anguilles (2008-2010).
-  Développer un programme national coordonné de suivi de passes classiques ou spécifiques pour la civelle et l'anguillette (2008-2012).

3 LES DISPOSITIFS D'ÉVITEMENT

Pour la dévalaison, l'**installation d'une barrière physique** (grilles fines dans la mesure où la vitesse d'eau est faible) associée à des exutoires ou plus généralement des ouvrages évacuateurs demeure actuellement **la seule solution potentiellement efficace pour interdire le transit des poissons par les turbines**. Cependant, certains ouvrages existants ne peuvent être aménagés dans des conditions techniques et/ou économiques acceptables. **L'arrêt des turbinages** peut être également une option à envisager mais **cette option suppose, qu'au préalable, la fenêtre de migration des anguilles soit bien déterminée**, condition nécessaire pour garantir l'efficacité de la mesure, et suffisamment courte pour que le coût des pertes énergétiques soit acceptable et proportionné aux enjeux.

-  Réduire ou arrêter des turbines durant les pics de migration.
-  Mettre en place des barrières physiques (grilles de prise d'eau) dont les espacements ne permettent pas le passage du poisson : prises d'eau *ichtyocompatibles*.
-  Mettre en place des barrières comportementales reposant sur des dispositifs (écrans sonores, lumineux, électriques, hydrodynamiques, à bulles ou à chaînes fixes et mobiles) induisant un changement de déplacement du poisson (évitement des turbines).

Les aménagements, tant à la montaison qu'à la dévalaison n'ont de sens que s'ils sont **correctement exploités et entretenus afin de pérenniser leur efficacité**.

3.1 ARRETS DE TURBINAGE

L'arrêt du turbinage en période de dévalaison a été envisagé comme solution aux mortalités dans les turbines. Cette solution nécessite soit **d'arrêter les turbines durant la nuit pendant toute la période de migration** (4 mois environ), soit de **les arrêter uniquement lors des pics de migration**.

La première alternative présente une efficacité maximale mais également des coûts élevés en perte de production. La deuxième alternative **nécessite de détecter ou de prédire les pics de migration**.

3.1.1 RECHERCHES EN COURS

Des investigations ont été conduites sur la prédiction de ces pics faite à l'aide de « biomoniteurs » tels que le Migromat. Ce système est malheureusement très sensible (variabilité forte des prédictions) et ne permet pas d'anticiper les pics de migration.

Un modèle prédictif des fenêtres environnementales propices à la dévalaison a été également développé par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN, publication à venir). Ce modèle se base sur des données synthétiques de l'état hydrologique (débit, température) et météorologiques (typologie climatique, luminosité globale) de l'environnement susceptible de déclencher les migrations. Ce modèle est en cours de validation sur la Loire et des tests doivent encore être faits pour estimer son applicabilité à d'autres bassins versants (Acou, Com.Pers.). Les premiers résultats de la validation croisée sur des données indépendantes indiquent une moyenne de 84% de bonnes prédictions (part des pics de dévalaison qui avaient été prédits par le modèle) et 40% de surprédictions (événements prédits qui n'ont pas donné lieu à des pics de dévalaison détectables par les captures des pêcheries professionnelles). Si ce modèle devait être appliqué en l'état, il prévoit que **l'arrêt des turbines pendant 46 jours pourrait permettre la sauvegarde de 80% des anguilles**, ou plus précisément leur éviter de s'exposer au transit dans les turbines hydroélectriques.

Les limites de l'approche par modélisation résident dans le degré d'incertitude de ces modèles. En effet, la modification du régime de turbinage sur les bases de prédictions incertaines peut résulter soit en une protection insuffisante de l'anguille, soit en des coûts difficilement acceptables induits par des périodes d'arrêt des turbines en excès par rapport à ce qui serait strictement nécessaire pour atteindre le degré de protection recherché.

3.1.2 L'EXEMPLE DE L'ARRET DU TURBINAGE SUR LA MAYENNE EN 2008

En 2008 le Tableau de Bord Anguille du Bassin Loire a proposé un protocole d'arrêt de turbinage sur la Mayenne afin de permettre une meilleure survie des anguilles lors de leur dévalaison. Ce protocole a été mis en place en fonction des périodes de crues, par l'étude des séries de débit des 20 années précédentes. Le groupe de travail, composé de l'ensemble des centraliers, des services administratifs (DDAF, ONEMA, DIREN), de LOGRAMI (TAB Anguille) et des fédérations de pêche, a permis une concertation et une disposition approuvée par tous.

Lors du COGEPOMI Loire du 19 septembre 2008, cette action a été présentée comme une *mesure d'urgence dans l'attente d'équipement adapté pour la dévalaison*. En effet, la mise en place de dispositifs d'évitement (grilles) et l'aménagement des turbines pour la diminution de leur impact sur les individus en migration constituent des mesures plus durables pour la survie des espèces, dans le cas où les ouvrages sont maintenus.

3.2 PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES

Diverses expérimentations ont été récemment conduites en Europe et en Amérique du Nord pour mettre au point des dispositifs permettant d'éviter l'entraînement dans les turbines. En France, l'étude sur la définition de prises d'eau « ichtyocompatibles » prenant en compte la dévalaison des migrateurs a permis de définir un certain nombre de critères de dimensionnement (Anonyme, 2007). Il apparaît que **la seule solution techniquement efficace connue à l'heure actuelle réside dans l'installation d'une barrière physique, c'est-à-dire un plan de grilles fines (espacements de 1.5 cm à 2 cm au maximum)**, associé à un ouvrage évacuateur ou un by-pass spécifique assurant un transit sans dommage à l'aval. Les recommandations contenues dans le rapport du groupe de travail « ouvrages » sont prises en compte pour la conception de prototypes de prises d'eau ichtyocompatibles. A travers l'accord-cadre de recherche et développement sur les ouvrages, plusieurs projets sont actuellement à l'étude, à l'exemple du suivi du prototype de prise d'eau de Navarrenx, sur la Gave d'Oloron (Figure 5).

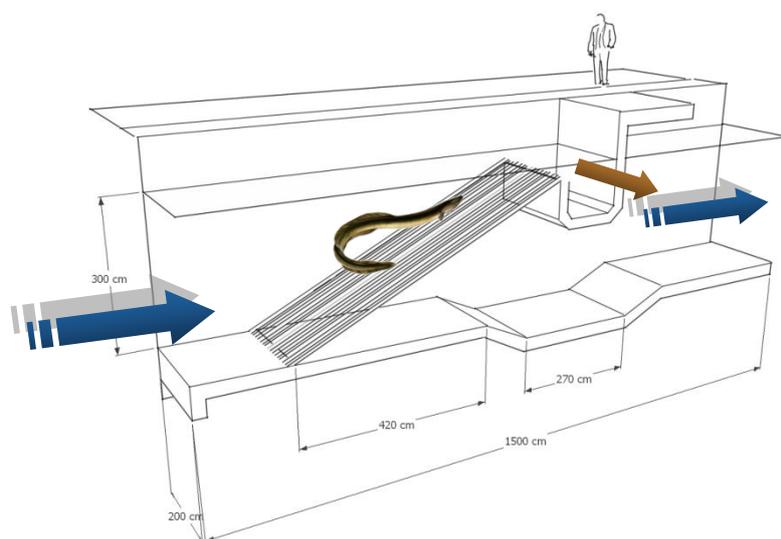


Figure 5 : Prototype de prise d'eau ichtyocompatible testé à Navarrenx (Gave d'Oloron). T. Besse, modifié d'après : ONEMA(Larinier, Thévenet, & Travade, 2008)

➡ Courant
➡ Echappement des anguilles vers un ouvrage évacuateur

Il apparaît que les vitesses à l'amont immédiat de telles grilles doivent rester suffisamment faibles pour éviter le placage du poisson contre les grilles (courant inférieur à 0.40-0.50 m/s environ), le non respect de ce critère étant susceptible d'induire des mortalités supérieures à celles résultant du transit par les turbines (Anonyme, 2007). L'installation de grilles fines sur un ouvrage existant implique dans la plupart des cas une augmentation significative de la surface du plan de grille initial et le plus souvent une modification de la structure de la prise d'eau, ce qui peut s'avérer problématique. **L'inconvénient majeur de l'installation de grilles fines réside dans l'augmentation des contraintes d'exploitation.**

3.3 BARRIERES COMPORTEMENTALES

Les stimuli visuels, auditifs, hydrodynamiques, électriques, ont donné lieu à un **grand nombre de barrières comportementales expérimentales destinées à repousser ou attirer les poissons en dévalaison** : écran lumineux attractif ou répulsif, écran à bulles, écran sonore, écran à chaînes fixes et mobiles, écran hydrodynamique, écran électrique... Ces dispositifs ont été testés essentiellement sur les salmonidés et les clupéidés et très peu à ce jour sur l'anguille. De façon générale, et ce quelle que soit l'espèce considérée, **les évaluations des barrières comportementales portant sur des installations grandeur réelle se sont révélées toujours beaucoup moins encourageantes que celles obtenues dans des conditions contrôlées en laboratoire** (Anonyme, 2007). Les barrières à infrasons semblent les plus prometteuses et font l'objet de tests in situ (Figure 6).



Figure 6 : test par télémétrie de l'efficacité de deux barrières à infrasons aux centrales de Baigts et Biron sur le gave de Pau. Source : Profish (Larinier, Thévenet, & Travade, 2008)

Ces dispositifs sont spécifiques aux espèces et aux tailles et ne fonctionnent que sous des conditions très particulières (Larinier, 2008). Leurs résultats devraient donc être validés pour chaque espèce avant une utilisation systématique en vue de la préservation des individus en dévalaison.

4 LES TURBINES ICHTYOCOMPATIBLES

4.1 CRITERES D'EVALUATION DE L'ICHTYOCOPATIBILITE

En 1995 le U.S. Army Corps of Engineers a organisé un groupe de travail pour identifier les causes de la mortalité et des dommages subis par les poissons lors de leur passage dans une turbine hydraulique (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Suite à cette analyse, des essais en laboratoire ont permis d'analyser en détail ces phénomènes et **des critères d'ichtyocompatibilité ont ainsi pu être proposés** :

-  **Dommages liés à des causes mécaniques** : abrasion, broyage, risque de chocs : La mortalité est minimale pour des vitesses inférieures à 12,2 m/s dans les jeux entre pièces mobiles et fixes (les pales et le manteau de la turbine, par exemple). **La préconisation est de 6.1 m/s.**
-  **Dommages liés au gradient de pression** : Les effets sont liés à la vitesse d'adaptation de la pression dans la vessie natatoire. Les seuils suivants ont été définis : **69kPa de pression minimum et 550kPa/s pour le gradient de pression.**
-  **Turbulence** : Elle est caractérisée par des gradients de vitesse. **Un seuil de l'ordre de 180m/s/m est préconisé.**

Ces critères ont été établis pour l'ensemble des espèces généralement affectées par les turbines et **ne sont pas spécifiques à l'anguille.**

4.2 LA TURBINE VLH

4.2.1 PRINCIPE

Le développement des turbines hydroélectriques s'est manifesté jusqu'à aujourd'hui par la réduction de la taille des turbines pour augmenter leur vitesse de rotation et leur rendement. Ces évolutions impliquent d'augmenter la vitesse à laquelle l'eau passe par la turbine. **Les turbines classiques installées sur de très basses chutes nécessitent donc des infrastructures importantes pour canaliser l'eau et éviter les pertes de charge.** Ces installations ne sont donc possibles que pour des débits élevés, afin que l'investissement reste intéressant.

Un nouveau concept de turbine a été mis au point en 2006 : la turbine « très basse chute » (VLH^{®2}) qui présente plusieurs intérêts : son installation ne nécessite pas de travaux de génie civil importants, ce qui permet de réduire les coûts ; sa rentabilité permet d'équiper des très basses chutes (2 à 3 m); **sa conception « ichtyophile^{®2} » vise à permettre le passage des poissons sans dommage à travers la turbine, en particulier les anguilles.**

² Les termes VLH[®] et ichtyophile[®] sont des marques déposées de MJ2 Technologies



Figure 7 : Modèle 3D du prototype de turbine VLH. Source : MJ2 Technologies (Leclerc, 2007).

La turbine VLH est équipée d'une roue de type Kaplan à 8 pales réglables en fonction du niveau d'eau et du débit. Elle est installée sur une structure autoportante, ce qui permet un assemblage en usine et une installation très rapide (par grutage). Elles disposent d'un dispositif d'arrêt et de coupure du débit par fermeture des pales sur elles mêmes sans énergie du réseau.

La turbine VLH est déclinée en 5 diamètres. La gamme des débits d'équipements va de 10 à 30 m³/s par groupe (structure autoporteuse). L'addition de plusieurs groupes sur un même site permet d'envisager des débits d'équipements totaux très importants.

Lorsque la configuration de l'installation ou les besoins d'exploitation le rendent nécessaire, la VLH peut être dotée d'un **dispositif d'effacement** lui permettant de pivoter vers le haut et de se retrouver en position horizontale au dessus du niveau amont. Dans cette position la turbine libère complètement le passage pour l'écoulement de la rivière, **restituant ainsi sa section utile à l'ouvrage de dérivation**. Cet effacement peut servir lors des travaux de maintenance de la turbine, de l'ouvrage de contournement (entretien), **mais aussi lors de crues**. En effet, la turbine VLH est adaptée à des débits maximums de 30m³/s pour le plus grand modèle, on peut supposer que lors des débits supérieurs, celle-ci doit être relevée. Elle permettrait ainsi le passage des géniteurs en période de grande crue, en fonction de la configuration du site. Cependant ce point n'est pas précisé et le dispositif d'effacement n'est proposé qu'en option.

4.2.2 ICTHYOPHILIE

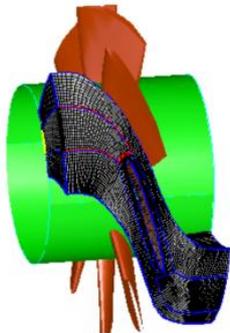


Figure 8 : maillage d'un canal de débit sur la roue de la turbine VLH (Kueny, 2005).

Les critères d'ichthyophilie de la turbine VLH ont été établis théoriquement en à partir du référentiel mis au point par le U.S. Army Corps of Engineers en 1995 (voir *Critères d'évaluation de l'ichtyocopatibilité*, page 11). Cette évaluation a été effectuée en 2005 par l'INPG sur un modèle numérique de la turbine VLH (études CFD), avant l'implantation du prototype à Millau. En effet, l'évaluation des dommages subis par les poissons dans les turbines est généralement mesurée préférentiellement sur des prédictions de modèles plutôt que sur des mesures réelles car il est difficile d'installer des instruments de mesure là où ces mécanismes sont susceptibles de créer le plus de dommages.

Critère	Acceptabilité	Valeur VLH
N°1: vitesse en périphérie de pales	6.1 (à 12.2) m/s	4.5 à 8 m/s
N°2: pression minimum rencontrée	69 kPa	94 kPa
N°3: gradient de pression maximum	550 kPa/s	80 kPa/s
N°4: gradient de vitesse maximum	180 m/s/m	10 m/s/m
N°5: jeu pale manteau	< 2 mm	4.5 mm

Ce dernier critère n'est pas rempli par la turbine VLH. L'étude souligne que les vitesses d'écoulement sont inférieures dans le cas de la turbine VLH (1,8 m/s) par rapport aux tests qui ont été effectués par le laboratoire de l'Idaho (supérieures à 4m/s). Les anguilles pourraient alors plus facilement s'éloigner de la paroi du manteau de la turbine VLH, tandis qu'une vitesse plus élevée l'obligerait à suivre le fil du courant. Il s'avèrera lors des

tests *in situ* que le piégeage entre la paroi du manteau et les pales de la roue est probablement la principale source de mortalité des anguilles dans cette turbine.

L'étude conclut enfin que *la turbine VLH se place, au point de vue qualitatif, nettement en deçà des valeurs maximum considérées comme acceptables (sauf pour le critère du jeu en bout de pale). Le modèle de turbine VLH est alors présenté commercialement comme « 100% ichtyophile©»*(Leclerc, 2007).

4.2.3 PROTOTYPE VLH INSTALLE A MILLAU



Figure 9 : La VLH du Moulin de Troussy vue de l'amont. Source : MJ2 Technologies

Un premier prototype de la turbine VLH a été installé sur le Tarn, au Moulin de Troussy, à Millau, en mars 2007.

D'une puissance de 350 kW, la turbine utilisée à Millau dispose d'un diamètre de roue de 4,5 m. Raccordée au réseau EDF, elle peut alimenter en électricité environ 200 foyers autour du cours d'eau. En une année, la centrale de Troussy a produit 1.8 GWh, dans des conditions très variées.

Sur la base de l'étude théorique sur les critères *ichtyophiles* de la VLH, les services concernés du département de l'Aveyron ont accordé l'autorisation d'exploitation de la chute de Troussy, à Millau pour une durée de 30 ans³, sans installer à priori de dispositif de dévalaison, sous réserve de réaliser des tests *in situ* destinés à confirmer ou non les résultats de l'étude théorique (Lagarrigue, Voegtler, & Lascaux, 2008).

En ce qui concerne la montaison, un programme de tests scientifiques sera réalisé sur le site de Millau afin d'évaluer la possibilité de franchissement dans les deux sens de la turbine en fonctionnement par les poissons.

4.2.4 EVALUATION DES MORTALITES

Objectif de l'étude

L'étude sur les mortalités de poissons associées au transit dans la turbine VLH avait pour but de montrer des taux de mortalité « acceptables » des espèces, condition nécessaire à l'exploitation du site de Millau. Les essais se sont déroulés en décembre 2007 sur la survie des anguilles argentées et en février 2008 sur les smolts de saumon atlantique. Les protocoles expérimentaux ont été conjointement définis par la société Forces Motrices de Farebout, le bureau d'études ECOGEA et le pôle R&D Ecohydraulique de l'ONEMA (GHAAPPE). Les tests ont été effectués par le bureau d'études ECOGEA, spécialisé dans l'étude des impacts d'aménagements sur les milieux aquatiques.

Protocole de test

Pour ces tests, des anguilles argentées de la Loire ont été achetées à un pêcheur professionnel de Varades (44) et transportées jusqu'à Millau dans un camion muni de cuves alimentées en oxygène.

Le protocole consiste à introduire les poissons à proximité de l'entrée de la roue au moyen d'un tube PVC. Ils sont ensuite immédiatement récupérés par un filet filtrant la totalité du débit en sortie de turbine. Les tests ont

³ Autorisation préfectorale du 16 janvier 2006

été faits en distinguant trois groupes de taille et trois points d'introduction : « moyen » (interne) ; « mi-pale » (intermédiaire) ; « périphérie » (externe) :



Figure 10 : Points d'insertion des anguilles dans la turbine VLH lors des tests à Millau en 2007.

Source : étude 2007 ECOGEA (Lagarrigue, Voegtle, & Lascaux, 2008)

Résultats

Les taux de mortalités observés sont respectivement de **0%**, **3%**, **15,6%** suivant que les poissons ont été injectés à proximité du moyen, à mi-pale ou à la périphérie de la roue.

Tableau 1 : Mortalités d'anguilles argentées observées après passage dans la turbine VLH. Source : étude 2007 ECOGEA (Lagarrigue, Voegtle, & Lascaux, 2008)

Anguilles	« mi-pale »	« moyen »	« Périphérie »
Gros individus (Lt > 850mm)	4,0%	0%	14,6%
Petits individus (Lt ≤ 850mm)	2,0%	0%	16,7%
Total	3%	0%	15,6%



Figure 11 : Les 7 anguilles du groupe "gros individus" sectionnées après avoir traversé la turbine VLH par sa périphérie. Source : ECOGEA (Lagarrigue, Voegtle, & Lascaux, 2008).

Lors des premiers tests, aucune mortalité différée (après 48h d'observation) n'a été observée, la mortalité totale correspond donc à la mortalité instantanée. Le plus souvent, il s'agit d'individus sectionnés en sortie de turbine (

Figure 11).

Le taux de mortalité global a été évalué en pondérant les résultats obtenus pour chacun des 2 points d'insertion en fonction du diamètre des 3 anneaux élémentaires de débit correspondants. Le calcul est donc fait en considérant une répartition homogène de l'eau dans la turbine et un débit constant suivant l'axe de rotation de la turbine.

Le taux de mortalité moyen sur l'anguille adulte (de tailles pour la plupart supérieures à 75 cm) a été évalué à **7.7 %** sur la turbine fonctionnant à pleine ouverture, ce qui correspond à des taux de l'ordre de 2 à 3 fois inférieurs à ceux induits par une turbine Kaplan classique fonctionnant à même débit sous une même chute.

Discussion

La période de dévalaison des anguilles s'étend généralement d'octobre à janvier, durant des fenêtres environnementales correspondant à des augmentations du débit. Les tests ont été réalisés avec le régime de fonctionnement de la turbine le plus courant dans ces conditions de fort débits, à savoir à pleine ouverture et pleine puissance. **Ces résultats ne sont donc valables que pour un régime de fonctionnement de la turbine à pleine ouverture.** En effet, Berg(1985) a pu montrer que la mortalité sur les anguilles augmentait significativement au fur et à mesure de la fermeture d'une roue Kaplan : **lors d'une réduction de débit, l'angle que font les pales avec le plan de la roue diminue et l'espace offert au poisson se trouve limité.**

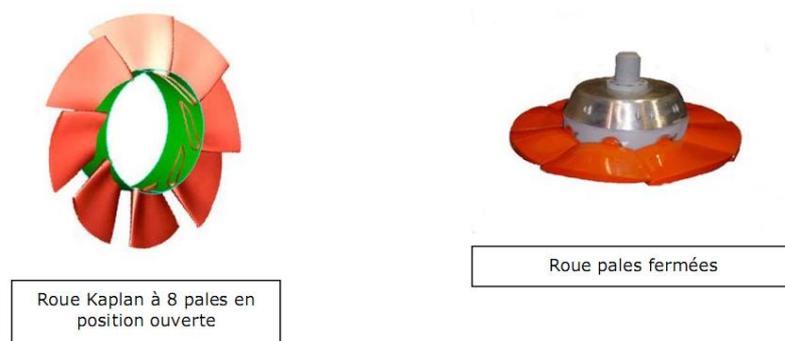


Figure 12 : Représentation d'une roue Kaplan à 8 pales utilisée dans les turbines VLH en position ouverte et fermée. Source : étude 2007 ECOGEA (Lagarrigue, Voegtle, & Lascaux, 2008)

Le protocole de test n'inclut pas la mortalité indirecte causée par le passage dans la turbine, comme par exemple l'effet des variations de pression, d'oxygénation et de la désorientation des anguilles après leur passage dans la turbine sur leur vulnérabilité face aux prédateurs. Cependant la configuration de la turbine (faible chute) et sa vitesse de rotation faible laissent penser que ces effets sont moindres que dans le cas des turbines classiques.

4.2.5 OPTIMISATION DE LA TURBINE



Figure 13 : Modélisation de la zone de pincement des anguilles, entre les pales de la roue et le manteau de la turbine (MJ2 Technologies, 2009).

L'analyse des tests de mortalité d'anguilles effectués sur le prototype de Millau a permis d'identifier la source des mortalités observées lors de l'insertion des anguilles à la périphérie de la turbine. L'existence d'une zone de pincement entre les pales de la roue et le manteau de la turbine est probablement la principale cause des sectionnements d'anguilles observés.

Afin d'améliorer les caractéristiques ichtyophiles des turbines VLH, le profil de l'hélice et du manteau ont été revus afin d'équiper les nouveaux modèles de turbines produits par MJ2 Technologies. Cette nouvelle configuration doit être fabriquée au second trimestre 2009 et testée en fin d'année 2009 (Leclerc, 2009, *com. pers.*). L'objectif annoncé est de ramener le taux de mortalité à un niveau de 1% à 3% pour les anguilles et 0% pour les espèces plus répandues et de taille plus réduite (MJ2 Technologies, 2009).

Si les taux de mortalités engendrés par la VLH, que ce soit pour des smolts de saumon atlantique ou des anguilles argentées adultes de grande taille, peuvent être considérés comme faibles par rapport à ceux obtenus lors du transit par des turbines Kaplan classiques, ils restent non négligeables. Ces taux deviennent significatifs si l'on considère les impacts cumulés sur un axe comportant une série d'ouvrages hydroélectriques entre les zones de grossissement des juvéniles de saumon et au cours des migrations des anguilles subadultes vers l'estuaire.

4.2.6 DÉVELOPPEMENT DES TURBINES VLH

Les résultats d'exploitation obtenus sur une année pour le prototype installé à Millau ont permis la mise en place en 2008 d'une nouvelle installation au Moulin de La Roche sur la Mayenne (MJ2 Technologies, 2009). Quatre chantiers sont en cours en 2009 et la turbine est maintenant produite industriellement. A terme, MJ2 projette d'équiper tous les seuils de la Mayenne avec des turbines VLH. En Belgique, deux turbines devraient être installées au site de Marcinelle, sur la Sambre, par une filiale belge de MJ2 Technologies.

4.3 LES AUTRES PROJETS DE TURBINES ICTHYOCOMPATIBLES

4.3.1 EN FRANCE

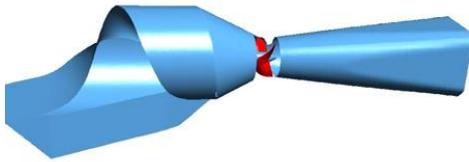


Figure 14 : Turbine "Vortex" Alden (ALSTOM, 2009).

De son côté, ALSTOM Power Hydro met au point une turbine « vortex » dont le design est pensé pour atteindre un niveau de survie des poissons supérieur aux résultats déjà obtenus sur leurs turbines. Sur ce modèle, la seule source de mortalité restante est l'hélice, tous les autres éléments assurent un passage aussi sécurisé que possible (ALSTOM, 2009). Des études évaluent les progrès faits en termes d'ichthyocompatibilité à partir des vitesses et turbulences mesurées dans les différents types de turbines (Loiseau, Davidson, Coutson, & Sabourin, 2006). Il n'est mentionné aucun test *in situ* à ce jour, ni évaluation des mortalités de poissons migrants.

4.3.2 A L'ÉTRANGER

Aux États-Unis, la mise en place de nouvelles législations impose la protection des poissons pour les centrales hydroélectriques. Le programme Hydropower du Laboratoire National de l'Idaho effectue des recherches sur les turbines à technologies avancées (*Advanced Technology Turbines*, ou ATT), notamment sur leur impact environnemental (hydropower.inel.gov, 2007). L'objectif est de *maximiser l'utilisation des ressources hydroélectriques en minimisant les effets sur l'environnement*. Ce laboratoire est spécialisé dans la modélisation du passage des poissons dans les centrales. Il effectue de nombreuses études de configuration de turbines, notamment à l'aide d'une « sonde-poisson » (Figure 15) qui permet de mesurer les contraintes subies lors du passage dans les turbines, mais aussi des tests sur la survie cumulée des salmonidés passant par de multiples turbines.

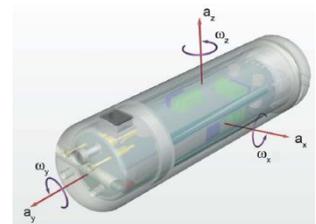


Figure 15 : The Sensor Fish (Dauble, 2007)

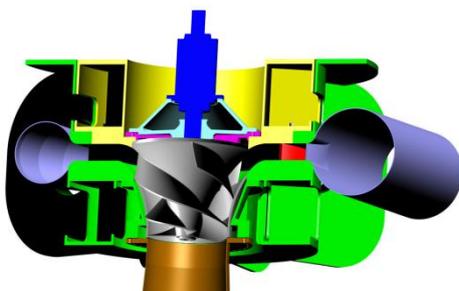


Figure 16 : Turbine "Fish-friendly" (ALDEN, 2009).

La mise au point d'un type de turbine « fish-friendly » (Figure 16) est en cours depuis plusieurs années au laboratoire d'Alden (USA). L'objectif est d'optimiser le rendement énergétique, de construire une turbine à taille réelle et de réaliser des tests biologiques *in situ*. Des tests pilotes ont été effectués et ont permis d'estimer les mortalités de poissons en fonction de leur taille et de la vitesse de rotation des pales : **83 à 93% de survie après 96h pour les truites arc-en-ciel, 90 à 100% de survie pour les autres espèces** (ALDEN, 2009). **Le taux de survie estimé pour le**

modèle à taille réelle est de 94% à 100%. L'EPRI (Electric Power Research Institute) pilote et finance ce programme grâce aux contributions financières de divers producteurs d'électricité. EDF est notamment impliqué dans le financement du programme en cours et effectue une veille sur l'état d'avancement des études. L'installation sur site d'un prototype et les tests de validation biologiques sont prévus en 2010-2012 *via* l'accord-cadre de recherche et développement français (Larinier, Thévenet, & Travade, 2008).

5 CONCLUSION

L'impact des installations hydroélectriques sur les populations de poissons migrateurs est étudié depuis une vingtaine d'années, et si aujourd'hui les causes de mortalités des poissons sont mieux connues, les technologies d'installations hydroélectriques ichtyocompatibles sont encore en cours de développement.

Les efforts de recherche et de développement devraient vraisemblablement permettre de diminuer sensiblement les impacts des ouvrages hydroélectriques, et contribuer à la réduction de toutes les sources de mortalités inscrite dans le règlement européen pour la reconstitution des stocks d'anguille européenne. On peut remarquer que les résultats sont souvent issus d'études financées par les entreprises productrices d'hydroélectricité elles-mêmes, ce qui incite à une certaine vigilance, compte-tenu des enjeux commerciaux existants.

En effet, aucun système n'assure aujourd'hui une mortalité nulle des poissons migrateurs, à plus forte raison dans le cas des anguilles, dont le comportement et la morphologie les rendent particulièrement vulnérables au passage dans les turbines. Cette considération prend tout son sens lorsqu'on prend en compte les impacts cumulés subis par les individus traversant successivement plusieurs ouvrages lors de leur migration. De plus, les effets de la combinaison de ces impacts et des autres facteurs de mortalité (prédation, pathologies) sont encore mal estimés ; il faut donc prévoir une marge de précaution dans l'estimation de la mortalité globale des anguilles en dévalaison. Il est nécessaire de prévoir autant que possible l'installation de dispositifs d'évitement, en complément de la réduction des dommages directs des turbines hydroélectriques.

6 TRAVAUX CITES

ALDEN. (2009). *Hydroelectric Turbines Design*. Consulté le Avril 5, 2009, sur www.aldenlab.com: http://www.aldenlab.com/index.cfm/Services/Hydroelectric_Turbine_Design

ALSTOM. (2009). *The fish-friendly turbine*. Consulté le avril 2, 2009, sur ALSTOM Hydro Power: http://www.hydro.power.alstom.com/home/technology_centers/turbine_technology_center/fish_friendly_turbines/7220.EN.php?languageId=EN&dir=/home/technology_centers/turbine_technology_center/fish_friendly_turbines/

Anonyme. (2007). *Conclusions du Groupe de Travail National "ouvrages"*. Règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles, MEEDAT, MAP.

Baisez, A. (2005). *Mortalités par les turbines*. Indicateurs Anguille Loire, LOGRAMI, Tableau de Bord Anguille du Bassin Loire.

Berg, R. (1985). Investigation on injuries of migrating eels caused by Kaplan turbines. *Working party on Eel organized by C.E.C.P.I.*, (p. 13p.). Perpignan.

Cada, G. F. (2001, september). The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival. *Fisheries, Bioengineering feature*, 26 (9), pp. 14-23.

Dauble, D. (2007). *Biological Assessment of the Advanced Turbine Design at Wanapum Dam, 2005*. Pacific Northwest National Laboratory.

Drummond, D. (2004). *Hydropower Gets Greener with Fish-Friendly Turbines From Voith Siemens Hydro Power Generation*, 29 mars 2004. Consulté le mars 27, 2009, sur www.businesswire.com: <http://www.businesswire.com/news/home/20040329005590/en>

hydropower.inel.gov. (2007). *Hydropower program : Advanced Turbine Systems*. Consulté le mars 27, 2009, sur Idaho National Laboratory: <http://hydropower.inel.gov/turbines/index.shtml>

Kueny, J. (2005). *Critères Ichthyophiles, préétude 8 pales*. Préétude Turbine Basse Chute VLH, INPG.

Lagarrigue, T., Voegtle, B., & Lascaux, J. (2008). *Test d'évaluation des dommages subis par les juvéniles de salmonidés et les anguilles argentées en dévalaison lors de leur transit à travers le groupe turbogénérateur VLH installé sur le Tarn à Millau, test de décembre 2007 avec des anguilles argentées*. Rapport, ECOGEA.

Larinier, M. (2008). *Avis sur les test d'évaluation des mortalités d'anguilles et de smolt de saumon atlantique effectués sur la turbine VLH de Millau*. Courrier au service départemental de la police de l'Eau, GHAAPPE.

Larinier, M., Thévenet, R., & Travade, F. (2008). *Anguilles et ouvrages, Programme R&D 2008-2009*. (ONEMA, Éd.)

Leclerc, M. (2007). *La turbine de Très Basses Chute ou VLH (pour Very Low Head Turbo-Generator)*. Document commercial, MJ2 TECHNOLOGIES S.A.R.L.

Loiseau, F., Davidson, R. A., Coutson, M., & Sabourin, M. (2006). *Fish Environment & New turbines design*. ALSTOM Power Hydro.

MJ2 Technologies. (2009). Lancement de la gamme industrielle VLH. (M. Technologies, Éd.) *Turbines de très basse chute, Very Low Head Turbines, Lettre d'information n°8, février 2009*, pp. 1-2.

MJ2 Technologies. (2009). Nouveau profil ichtyophile, premier contrat en Belgique. *Turbines de très basse chute, Very Low Head Turbines, Lettre d'information n°8, février 2009*, p. 6.

ONEMA. (2008). Les producteurs d'hydroélectricité signent avec l'Onema et l'Ademe un accord-cadre de Recherche et Développement. *Communiqué de Presse, 8 décembre 2008*, 2p.

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Turbine passage survival of juvenile spring chinook Salmon at lower Granit Dam, Snake River, Washington*. Portland District: Hydraulic Design Center.

TEXTES DE LOI

Règlement (CE) no 1100/2007 du Conseil du 18 septembre 2007 instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes (Journal Officiel des Communautés européennes du 22/09/2007).