

LES

Rencontres

DE L'ONEMA

Synthèse

Plan de sauvegarde de l'anguille Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages ?

SÉMINAIRE DU PROGRAMME R&D ANGUILLES-OUVRAGES
28 ET 29 NOVEMBRE 2011, PARIS



Philippe Baran et Laurent Basilico

Plan de sauvegarde de l'anguille
Quelles solutions pour
optimiser la conception
et la gestion des ouvrages ?

*SÉMINAIRE DU PROGRAMME R&D ANGUIILLES-OUVRAGES
28 ET 29 NOVEMBRE 2011, PARIS*

Philippe Baran (Onema) et Laurent Basilico (journaliste)
en collaboration avec Michel Larinier (Onema),
Christian Rigaud (Irstea)
et François Travade (EDF-LNHE)



© Onema

Le séminaire «Anguilles et continuité écologique : optimiser la conception et la gestion des ouvrages» a été organisé par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques et le comité de pilotage du programme R&D Ouvrages-Anguilles.

Il s'est tenu les 28 et 29 novembre 2011, dans l'auditorium du Palais de la Porte Dorée, à Paris, grâce à un partenariat avec l'Aquarium tropical.

Cette synthèse est consultable sur le site de l'Onema (www.onema.fr/synthese-anguilles-ouvrages), elle est référencée sur le portail national « Les documents techniques sur l'eau » (www.documentation.eaufrance.fr).

Contacts

*Philippe Baran
Responsable du pôle
éco-hydraulique
Onema-Irstea-IMFT
philippe.baran@onema.fr*

*Christian Rigaud
Ingénieur de recherche
pôle éco-hydraulique
Onema-Irstea-IMFT
christian.rigaud@irstea*

*François Travade
Ingénieur de recherche
EDF-LNHE
francois.travade@edf.fr*

*Laurent Basilico
Journaliste
lbasilico@free.fr*

Hier encore très répandue dans plupart des eaux douces d'Europe, l'anguille européenne connaît une régression rapide depuis les années 1970-1980. Les causes de ce déclin brutal, qui menace désormais la pérennité de l'espèce, sont pour l'essentiel connues : prélèvements par la pêche, dégradation de la qualité des eaux et des habitats, fragmentation des rivières sous l'effet des seuils et barrages et mortalités lors des passages dans les turbines hydroélectriques.

Pour répondre aux objectifs de restauration des stocks fixés par l'Union européenne, la France s'est engagée dans un plan de gestion visant à agir sur chacun des facteurs de déclin de l'espèce. Sur le volet «ouvrages», le Ministère en charge de Développement durable a initié un programme de recherche & développement multi-partenarial, réunissant l'Ademe, l'Onema et cinq acteurs français de l'hydroélectricité : Compagnie Nationale du Rhône, EDF, France Hydro Électricité, GDF Suez, Société hydroélectrique du Midi.

Résolument opérationnel, ce programme, encadré par un comité de pilotage rassemblant les acteurs précédemment cités et placé sous l'autorité du MEDDE, s'est traduit par la mise au point et le test de solutions techniques en vue d'une mise en œuvre directe sur les territoires. L'ensemble de ces acquis ont été présentés lors d'un colloque les 28 et 29 novembre 2011 qui a rassemblé près de 160 personnes : scientifiques, gestionnaires de l'eau, associations, producteurs d'hydroélectricité .

Comment favoriser la montaison de l'anguille, depuis les premiers ouvrages de la zone estuarienne jusqu'aux grands barrages situés en amont ? Comment améliorer ses conditions de dévalaison à l'échelle d'un ouvrage ? Comment enfin diagnostiquer les impacts cumulés à l'échelle d'un axe de cours d'eau, en vue d'une gestion adaptée du turbinage ? Ces trois chapitres de la partie 1 sont complétés, en partie 2, par un ensemble de seize fiches opérationnelles retraçant les actions du programme.

Sommaire

Des solutions opérationnelles pour répondre à l'urgence écologique et à l'impératif réglementaire de sauvegarde de l'anguille 6

Partie 1 : Du diagnostic des impacts à la mise en oeuvre des solutions techniques

1 - La montaison : impact des ouvrages et solutions techniques.	18
1.1 - Montaison et colonisation : une étape cruciale pour la pérennité de l'espèce	20
1.2 - Premiers ouvrages à la mer : quels impacts, quelles solutions	26
1.3 - Grands ouvrages : faciliter le franchissement.	38
1.4 - Une démarche de priorisation dans la reconquête des axes migratoires.	44
2 - La dévalaison : impacts et solutions à l'échelle de l'ouvrage	48
2.1 - Comportement des anguilles face à l'ouvrage	50
2.2 - Impacts des turbines sur les anguilles dévalantes.	56
2.3 - Turbines ichtyocompatibles	61
2.4 - Prises d'eau ichtyocompatible.	64
3 - La dévalaison : impacts et solutions à l'échelle du cours d'eau	70
3.1 - Impacts cumulés : une méthode de diagnostic prometteuse	72
3.2 - Anticiper les périodes de dévalaison : vers une gestion adaptée du turbinage	76

Partie 2 : Des fiches techniques pour l'action

4 – Des actions pour la connaissance	90
Fiche 1 - Mise au point d'un protocole d'échantillonnage pour la détermination des rythmes de dévalaison de l'anguille sur la Dordogne	92
Fiche 2 - Mode de franchissement d'obstacles en série sur le Rhin.	95
Fiche 3 - Migration de dévalaison et franchissement d'aménagements hydroélectriques : l'étude du Gave de Pau	98

5 – Des outils de diagnostic indispensables à la mise en oeuvre des solutions de gestion. 102

Fiche 4 - Marquage-recapture et évaluation de l'efficacité d'un dispositif spécifique de franchissement	104
Fiche 5 - Mise au point et test d'un compteur automatique à résistivité pour anguillettes	108
Fiche 6 - Evaluation <i>in situ</i> des mortalités dans des turbines de grande taille	111
Fiche 7 - Etablissement de formules prédictives de mortalité des anguilles lors du transit à travers les turbines Kaplan.	114
Fiche 8 - Evaluation des dommages cumulés causés par les aménagements hydroélectriques sur la dévalaison des anguilles argentées à l'échelle d'un axe de cours d'eau	117
Fiche 9 - Prédiction des flux dévalants d'anguilles en fonction de facteurs environnementaux : développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage	120

6 – Des solutions techniques qui respectent l'équilibre coût/efficacité 124

Fiche 10 - Gestion hivernale des 1 ^{ers} ouvrages à la mer pour le franchissement des anguilles. Tests d'admission limitées.	126
Fiche 11 - Test d'une passe à anguille « à brosses » pour un barrage de grande hauteur – Golfech (Garonne)	130
Fiche 12 - Test du biomoniteur MIGROMAT® sur la rivière Shannon (Irlande)	133
Fiche 13 - Test d'un dispositif de répulsion à infrasons au droit de deux ouvrages hydroélectriques sur le Gave de Pau	136
Fiche 14 - Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Perte de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés et champs de vitesse à leur approche	139
Fiche 15 - 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)	143
Fiche 16 - Contribution à la mise au point de la turbine « <i>Fish Friendly</i> » ALDEN	145

Partie 3 : Glossaire et références 148

Des solutions opérationnelles pour répondre à l'urgence écologique et à l'impératif réglementaire de sauvegarde de l'anguille

De la mer des Sargasses aux eaux continentales : un cycle de vie encore mystérieux

L'unique lieu de ponte repéré actuellement est situé dans les profondeurs de la mer des Sargasses, en Atlantique Nord-Est. La phase la plus intense de reproduction a lieu en mars/avril et de petites larves transparentes (moins de 7 mm), baptisées leptocephales, sont observées au voisinage de cette zone de la fin février à la fin juin. Leur migration océanique s'effectue de manière passive pendant une durée moyenne estimée actuellement à 18 mois : portées par les courants favorables, elles parviennent au voisinage du talus continental européen où se déroule leur métamorphose en civelles transparentes : modification de forme, perte d'eau, réduction de la taille et du poids et arrêt de l'alimentation.

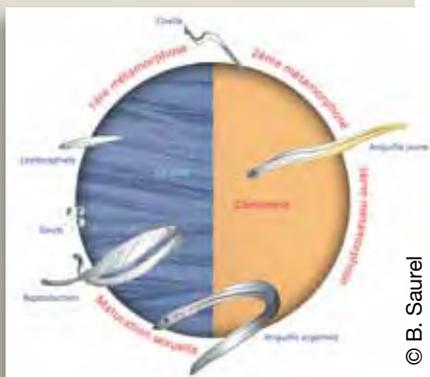
Ces civelles pénètrent par bouffées dans les estuaires, au gré des marées. Certains individus resteront dans les zones estuariennes et littorales, d'autres coloniseront des eaux douces à la faveur de fenêtres de migration de quelques mois (3 mois environ chaque année) ; cette phase concerne essentiellement des individus de moins de 30 cm, la taille moyenne des migrants augmentant avec la distance à la limite de marée.

À un moment donné, chaque individu cesse sa migration et s'implante dans un habitat favorable pour sa croissance, tous les milieux continentaux pouvant être concernés. La différenciation des sexes intervient à partir d'une taille de 20 cm. Au terme de la phase de croissance, l'anguille vit sa seconde métamorphose, la prise d'argenture qui la prépare à son retour en mer : les mâles (argenture entre 27 et 45-50 cm) sont observés dans les zones côtières, littorales et dans les zones aval des bassins versants. Les femelles (argenture à plus de 45 cm jusqu'à plus de 1,20 m) sont présentes partout et sont les seules observées dans les zones amont.

Ce sont ces anguilles dites « argentées » qui, à la faveur des coups d'eau automnaux et hivernaux dévalent les cours d'eau pour rejoindre la mer et après 5 000 km de migration océanique, leur lieu de naissance pour contribuer à leur tour à la pérennité de l'espèce...

Ce cycle de vie recèle encore de nombreuses zones d'ombres comme celles sur la différenciation sexuelle ou sur l'âge de la prise d'argenture. On sait aujourd'hui que certains individus passent toute leur vie en mer, mais les raisons de ce comportement, comme la proportion d'individus qu'il concerne, sont actuellement non connues. La reproduction artificielle et l'élevage très mal maîtrisée ne peuvent apporter une véritable solution pour le maintien de l'espèce qui réclame le brassage des millions de géniteurs aux parcours très divers, brassage garant des caractéristiques si particulières de l'espèce.

La survie de l'anguille restera donc conditionnée notamment à sa liberté d'aller et venir entre amont et aval, eaux douces et eaux salées au sein des bassins versants.



Le cycle de vie de l'Anguille d'après Dekker 2000

Un déclin qui pousse à l'action

Un déclin brutal lié à de nombreux facteurs

Il y a seulement quelques décennies, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) était très répandue et abondante dans plupart des eaux douces d'Europe. Elle se rencontrait dans les petits cours d'eau côtiers, les rivières de plaine, remontant souvent les bassins versants jusqu'aux zones très amont. Ce poisson ubiquiste et vagabond était également commun dans eaux des marais, des canaux ou des lacs, colonisant jusqu'aux étangs isolés.

Depuis le début des années 1980, ses populations comme celles de ses cousines américaines et japonaises connaissent une **régression rapide**, qui menace désormais la pérennité de l'espèce dans de nombreux bassins versants européens. Les causes de ce déclin brutal sont, pour l'essentiel, connues. Comme de nombreuses espèces vivantes dans nos eaux, notamment

de migrateurs amphihalins, l'anguille subit d'abord la **dégradation des milieux continentaux** qui l'abritent. L'intensité des prélèvements, l'anthropisation croissante des territoires, l'aménagement et la chenalisation de certaines sections des cours d'eau, l'assèchement de zones humides fragilisent et fragmentent ses habitats de prédilection. Avec le développement de l'industrie et de l'agriculture intensive, de nombreux **polluants chimiques** ont été relâchés dans le milieu naturel, impactant en premier lieu la qualité des eaux continentales.

Dans le cas de l'anguille, dont la chair est estimée, **la surpêche et le braconnage** sont des facteurs aggravants. C'est vrai en particulier dans le cas des civelles, ou pibales, individus juvéniles capturés aux engins lors de leur remontée dans les estuaires. Celles-ci font partie intégrante du patrimoine gastronomique de certaines régions et sont aussi commercialisées pour

l'alevinage contrôlé de certaines masses d'eau. Enfin, les différents **ouvrages** implantés sur les cours d'eau constituent un écueil supplémentaire pour cette espèce migratrice. Lors de la montaison, les civelles rencontrent une grande variété d'ouvrages à marée – portes à clapet, écluses, vannes – qui peuvent restreindre ou empêcher leur accès aux eaux continentales. Poursuivant leur migration vers l'amont, les jeunes anguilles sont ensuite confrontées aux seuils et barrages et parmi eux les ouvrages hydroélectriques, qui forment en l'absence d'aménagements spécifiques, des obstacles parfois difficilement franchissables. Tous ces ouvrages plus ou moins perméables provoquent toujours des concentrations plus ou moins importantes et longues d'individus se soldant par un retard dans la progression vers l'amont et par une hausse du niveau de mortalité (impact des prédateurs, captures, problèmes sanitaires induits). Des années plus tard, au retour des reproductrices vers la mer, les installations hydroélectriques implantées au long des cours d'eau peuvent à nouveau entraîner des mortalités cumulées significatives : une part

plus ou moins importante des animaux transite par les turbines, selon le type d'ouvrage et sa configuration.

Prise en compte récente par les politiques publiques : du règlement européen au Plan de gestion français

Désormais classée sur la liste des espèces menacées d'extinction par l'UICN, l'anguille fait aujourd'hui l'objet d'une politique de préservation à l'échelle européenne. Le 18 septembre 2007, l'Union adoptait un règlement (CE N° 1100/2007) instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes. Ce règlement, obligatoire, demande à chaque état membre de mettre en place sur son territoire un plan de gestion de l'anguille visant à *réduire la mortalité d'origine anthropique afin d'assurer avec une grande probabilité un taux d'échappement vers la mer d'au moins 40 % de la biomasse d'anguilles argentées correspondant à la meilleure estimation possible du taux d'échappement qui aurait été observé si le stock n'avait subi aucune influence anthropique.*

En France, ces dispositions se sont traduites par l'adoption d'un **plan de gestion**, élaboré par les ministères en charge des pêches maritimes et en charge du développement durable, il est décliné par grand bassin hydrographique. Approuvé par la commission européenne le 15 février 2010, ce plan comprend plusieurs volets pour agir sur chacun des facteurs du déclin des populations d'anguilles : réglementation de la pêche, lutte contre le braconnage, aménagement des ouvrages, repeuplement des rivières et amélioration de la qualité des eaux. L'ensemble de ces dispositions est synthétisé par une brochure publiée par l'Onema en octobre 2010, accessible en ligne (www.onema.fr/Plan-anguille-approuve).

Sur le volet halieutique, le plan de gestion prévoit entre autres la mise en place de quotas de pêche professionnelle pour les civelles, l'instauration d'une période de fermeture de plusieurs mois pour l'anguille jaune, l'interdiction quasi-totale de la pêche de l'anguille argentée et une réglementation restrictive pour la pêche amateur – avec notamment l'interdiction de la pêche des anguilles de nuit et de la capture des anguilles argentées. L'objectif de ces mesures est de réduire de 60 % la mortalité par pêche, pour chacun des stades de l'anguille, d'ici 2015. Le plan de gestion prévoit en outre que, d'ici 2013, 60 % des civelles pêchées en France doivent être utilisées pour alimenter les programmes de repeuplement en Europe, dont 5 à 10 % pour les bassins français.

Agir pour limiter les impacts des seuils et barrages

Le volet «ouvrages» du plan de gestion vise à améliorer les conditions de déplacement des anguilles le long des cours d'eau français : cet effort concerne la montaison des civelles et anguilles jaunes, mais aussi la dévalaison des argentées qui sont évidemment exposées à des

mortalités si elles transitent par les turbines hydroélectriques. Pour cette seconde migration, l'objectif français est de permettre, à terme, un échappement de 40 % des reproductrices par rapport à une biomasse non influencée par les facteurs anthropiques.

Dans cette optique, il est apparu nécessaire de cibler l'effort, dans un premier temps, sur l'aménagement des ouvrages présentant le meilleur rapport coût/efficacité au regard de la protection de l'anguille. Cette analyse a conduit les services de l'État à identifier une **zone d'action prioritaire** (ZAP, schématisée en figure 1),

dans laquelle tous les ouvrages devront faire l'objet d'un diagnostic, et au besoin d'adaptations, pour devenir franchissables sans dommage, dans les deux sens, d'ici 2015.

Cette zone d'action prioritaire comprend 1 555 ouvrages identifiés, dont 233 sont à usage hydroélectrique.

Figure 1. La zone d'action prioritaire du volet «ouvrages» du plan national de gestion de l'anguille.



Pour faciliter la mise aux normes des ouvrages dans un délai de cinq ans, le plan de gestion organise également le **classement des cours d'eau français**, par tronçons, en deux catégories (cumulables, listes 1 et 2). Sur les segments classés en liste 1, définis comme nécessitant une protection complète des poissons migrateurs, aucun nouvel obstacle à la continuité écologique ne pourra être implanté. Le classement en liste 2 impliquera l'obligation de mise en conformité des ouvrages, aux plans de la gestion, de l'entretien et de l'aménagement, dans un délai de cinq ans.

Le succès de ce dispositif est bien sûr conditionné par la capacité des acteurs concernés à identifier, pour un cours d'eau ou un ouvrage donné, les options techniques présentant la meilleure efficacité au regard de leur coût économique. Avant l'adoption du plan de gestion, l'essentiel des travaux visant l'anguille avait porté sur les dispositifs pour la montaison des civelles et des jeunes anguilles. Depuis les années 1990, certains ouvrages sont ainsi équipés de rampes couvertes de substrats artificiels (plots ou

brosses) notamment dans les bassins versants de la côte atlantique et du Sud-Ouest de la France. Dans l'optique du plan de gestion, ces solutions existantes devaient être réinterrogées, au besoin améliorées. Mais surtout, elles devaient être largement complétées et étendues pour prendre en compte tous les types d'obstacles et envisager la migration de dévalaison pour le retour à la mer des géniteurs.

Tel était l'objectif du programme de recherche et développement «Anguilles-Ouvrages» mis en oeuvre par le Ministère en charge de développement durable, en appui au plan de gestion français.

Le programme R&D Anguilles-Ouvrages : sous le signe du partenariat

Trois années durant, le programme R&D a associé, avec le soutien de l'Ademe, les équipes de l'Onema et de cinq acteurs français de l'hydroélectricité : Compagnie nationale du Rhône, EDF, France Hydro Électricité, GDF Suez, Société hydroélectrique du Midi. Au bord de l'eau ou dans les laboratoires, plus de 50 techniciens et scientifiques mobilisés ont mené à bien un ensemble de 16 actions de recherche, dans une optique résolument opérationnelle.

Tableau 1. Les seize actions de recherche complémentaires du programme R&D Anguilles-Ouvrages (les n° d'action correspondent à la liste établie lors de la signature de l'Accord Cadre).

Action n°	N°Fiche (voir Partie 2)	Intitulé	Responsables scientifiques
9	1	Mise au point d'un protocole d'échantillonnage pour la détermination des rythmes de dévalaison de l'anguille sur la Dordogne	Laurence Lissalde-Bonnet (EDF-CIH)
10	2	Mode de franchissement d'obstacles en série sur le Rhin	Éric de Oliveira (EDF R&D – LNHE)
7	3	Migration de dévalaison et franchissement d'aménagements hydroélectriques : l'étude du Gave de Pau	Michel Larinier (Onema), Philippe Baran (Onema), François Travade (EDF R&D)
2	4	Marquage-recapture et évaluation de l'efficacité d'un dispositif spécifique de franchissement	Christian Rigaud (Irstea), Hilaire Drouineau (Irstea), Philippe Baran (Onema)
4	5	Mise au point et test d'un compteur automatique à résistivité pour anguillettes	François Travade (EDF R&D)
5	6	Évaluation in situ des mortalités dans les turbines de grande taille	Éric de Oliveira (EDF R&D – LNHE), Franck Pressiat (CNR Ingénierie)
6	7	Établissement de formules prédictives de mortalité des anguilles lors du transit dans les turbines Kaplan	Peggy Gomes (Onema), Michel Larinier (Onema)
15	8	Évaluation des dommages cumulés causés par les aménagements hydroélectriques sur la dévalaison des anguilles argentées à l'échelle d'un axe de cours d'eau	Peggy Gomes (Onema), Michel Larinier (Onema), Philippe Baran (Onema)
16	9	Prédiction des flux dévalants d'anguilles en fonction de facteurs environnementaux : développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage	Anthony Acou (MNHN)
1	10	Gestion des premiers ouvrages à la mer pour le franchissement des anguilles	Christian Rigaud (Irstea), Philippe Baran (Onema)
3	11	Test d'une passe à anguilles «à broches» pour un barrage de grande hauteur – Golfech (Garonne)	François Travade (EDF R&D)
8	12	Test du biomoniteur Migromat® sur la rivière Shannon (Irlande)	Michel Larinier (Onema), François Travade (EDF R&D)
11	13	Test d'un dispositif de répulsion à infrasons au droit de deux ouvrages hydroélectriques du Gave de Pau	Michel Larinier (Onema), Philippe Baran (Onema), François Travade (EDF R&D)
12	14	Définition de prises d'eau ichtyocompatibles : pertes de charge au passage des plans de grille et champs de vitesse à leur approche	Laurent David (Institut P ³), Ludovic Chatellier (Institut P ³), Dominique Courret (Onema), Michel Larinier (Onema)
13	15	Tests d'évaluation des dommages subis par les anguilles de dévalaison lors de leur transit à travers le nouveau groupe turbogénérateur VLH installé sur la Moselle à Frouard	M. Larinier (Onema), Lagarrigue (ECOGEA)
14	16	Contribution à la mise au point de la turbine ichtyocompatible ALDEN	François Travade (EDF R&D)

Au travers seize actions de recherche complémentaires (voir tableau 1), menées entre 2009 et 2011 pour un budget total de 4,5 millions d'euros, ce programme est une composante-clé du plan national. Il s'est traduit par des avancées significatives pour la compréhension du comportement de l'anguille au droit des ouvrages, la quantification des mortalités induites par chaque type d'ouvrage, les diagnostics

d'impact à l'échelle de l'axe du cours d'eau, enfin l'identification d'un jeu de solutions techniques et d'aménagements testés et validés. Ces apports, issus d'une collaboration fructueuse entre l'Onema, l'Ademe et les professionnels de l'hydroélectricité, sont synthétisés dans le présent document. Ces actions ont également fait l'objet d'une fiche de synthèse, disponible en partie 2 de ce document.

De la recherche à la mise en œuvre opérationnelle : concertation et stratégie de territoires

Les seize actions de recherche menées dans le cadre du programme R&D se traduisent par un ensemble de connaissances nouvelles, de solutions et d'outils opérationnels, qui ouvrent la voie à une réponse concertée des acteurs économiques face aux défis de la restauration de l'espèce. Au cours de ces trois années de travaux, l'ensemble des acteurs engagés dans le programme – dans le chapitre 4 – ont testé un large éventail de méthodes, précisé leurs conditions d'application, écarté quelques fausses pistes. Fort de ces avancées, le volet «ouvrages» du plan de gestion de l'anguille peut

désormais entrer rapidement en phase de déploiement opérationnel. Le choix des compromis techniques, sur la base d'un diagnostic validé et nécessairement partagé, devra s'effectuer à la lueur d'une analyse coût/efficacité propre à chaque ouvrage. Les problématiques liées au financement des aménagements appellent maintenant des réponses précises, comme l'ont souligné les échanges tenus entre les différentes parties prenantes – gestionnaires, collectivités, producteurs d'électricité – lors de la table ronde finale du séminaire.

Face à l'urgence écologique, face à l'impératif réglementaire, une condition du succès réside dans la continuité entre le diagnostic, la définition des actions, leur mise en oeuvre et leur contrôle. C'est par une mise en oeuvre concertée, entre les différents acteurs et aux différentes échelles de gestion, de l'ouvrage au bassin versant, que les options synthétisées dans ce document contribueront à l'atteinte des objectifs de restauration des stocks fixés par les pouvoirs publics. Pour y parvenir, la réponse collective doit être appuyée par une méthodologie adéquate. Cette réflexion a été amorcée par les membres du comité de

pilotage du programme R&D, réunis dans la foulée du séminaire de restitution.

Toute problématique liée à la gestion et à la restauration des écosystèmes est d'abord à appréhender à l'échelle du territoire. Ainsi, dans le cas de la problématique des impacts des ouvrages sur la migration de l'anguille, il apparaît d'abord nécessaire de **définir le territoire le plus pertinent** pour mener le diagnostic et, en conséquence, identifier les actions nécessaires. La zone d'action prioritaire (ZAP), décrite précédemment, est un territoire «technique» qui permet de cibler l'effort sur l'aménagement des ouvrages pré-



sentant le meilleur rapport coût/efficacité au regard de la protection de l'anguille. S'il constitue un outil réglementaire et opérationnel indispensable, il ne doit pas se révéler une limitation dans la conception des actions de restauration des stocks d'anguilles.

C'est à l'échelle du **bassin versant** que l'anguille opère la colonisation des eaux douces, migration qui conditionne sa répartition dans les habitats continentaux. C'est donc à cette même échelle globale que peuvent être conçues les actions locales d'aménagement et de gestion des ouvrages qui permettront d'optimiser la montaison de l'anguille et son établissement dans les habitats les plus favorables et par la suite sa dévalaison.

Sur chaque territoire, la mise en oeuvre des plans d'actions doit en outre s'appuyer sur la **mobilisation de l'ensemble des acteurs** concernés : gestionnaires, collectivités, pêcheurs, services de l'Etat, financeurs potentiels... Le comité de pilotage du programme R&D recommande de les rassembler dès le lancement de la démarche, et de fournir à chacun une vision claire et partagée

des enjeux, via notamment un effort de pédagogie sur les acquis techniques et scientifiques.

Il apparaît en particulier nécessaire de créer un «collectif», sous une forme à définir, pour réunir durant toute la durée de la démarche l'ensemble des gestionnaires prêts à s'engager dans des actions. Cet organe de concertation permettra de partager le diagnostic, les méthodes et les résultats. Il devra être animé et piloté par un **porteur de projet** identifié comme légitime, sous la férule d'un comité de suivi partenarial. Une telle coordination travaillera bien sûr **en lien avec les dispositifs** de concertation en place (commissions locales de l'eau, comités de rivières...) et les procédures en cours (SAGE, SDAGE, contrats de bassins ou contrats de milieux). Elle sera garante de la conception et de la mise en oeuvre de plans d'actions prioritaires et intégrés, à l'échelle du territoire. ■

Du diagnostic des impacts à la mise en oeuvre des solutions techniques

1

La montaison :

impacts des ouvrages et solutions techniques



À leur arrivée sur le plateau continental européen, après un voyage de sept à neuf mois, les anguilles connaissent leur première métamorphose : les larves leptocéphales, en forme de «feuille de saule», cessent de s'alimenter et deviennent des civelles au corps cylindrique, d'une longueur moyenne de 75 mm. C'est sous cette forme que l'animal, attiré par les panaches d'eau dessalée, se concentre à l'entrée des estuaires et franchit la limite de marée. C'est le début de leur migration vers l'amont des bassins versants, qui verra les anguilles, sous forme de civelles puis d'anguilles jaunes, s'établir dans les habitats où elles passeront leur vie. Cette phase dite de montaison conditionne évidemment la répartition de ses populations dans un bassin versant donné. La présence d'un grand nombre d'ouvrages sur les cours d'eau, des portes à marée installées dans la zone littorale aux barrages implantés plus en amont, peuvent constituer à ce titre autant d'obstacles à la colonisation des anguilles.

Après un aperçu des connaissances actuelles sur le comportement et la biologie de l'espèce à la montaison, ce premier chapitre présente les apports du programme R&D pour la compréhension des impacts des ouvrages sur cette migration fondatrice, et décrit les dispositifs et les solutions techniques proposés pour les aménager ou améliorer leur gestion.

1.1 – Montaison et colonisation : éléments de biologie

La phase de colonisation détermine la répartition des individus au sein des habitats présents dans un bassin versant. La biologie des jeunes anguilles à la montaison, et ses liens avec la problématique des ouvrages, sont longtemps demeurés méconnus. Avec l'évolution rapide du statut de l'espèce, cette thématique fait désormais l'objet d'un effort de recherche croissant, servi par le développement de nouveaux outils : microchimie sur os ou muscles, génétique, physiologie, marquages et suivis comportementaux, suivi de passes, analyses statistiques et modélisation.

En préalable aux expérimentations menées in situ dans le cadre du programme R&D, un panorama des connaissances disponibles a été dressé, sur la base de plus de 110 références bibliographiques, émanant de travaux en majorité français, et présenté (Christian Rigaud, Irstea, Pôle écohydraulique, Philippe Baran, Onema, Pôle écohydraulique) lors du séminaire de restitution des 28 et 29 novembre 2011.

La colonisation, phase déterminante pour la répartition de l'espèce

Après un voyage transocéanique de plus d'une année et une métamorphose, les civelles transparentes cessent de s'alimenter. Attirées par les panaches d'eau dessalée, elles s'approchent puis pénètrent dans les estuaires, portées par les courants de marée. Très vite en contact avec l'eau douce, elles sont confrontées, selon les périodes et les sites, à des environnements littoraux ou estuariens très variables (marnages plus ou moins importants, stratifications halines plus ou moins prononcées, rapports variables entre la force de la marée et le débit fluvial).

Leur entrée dans les estuaires s'effectue par vagues successives pendant plusieurs mois (novembre à avril sur la façade atlantique par exemple). Chaque individu se pigmente à une vitesse dépendant de la salinité et de la température de l'eau (en moyenne en 45-60 jours), avec à mi-chemin de ce développement pigmentaire, une reprise alimentaire significative.



Ce phénomène modifie le comportement de la civelle dans la zone soumise à marée. Dans la phase initiale, elle est essentiellement pélagique, ce qui la rend souvent accessible aux engins de pêche filtrants. Pour progresser dans l'estuaire avec des capacités physiques réduites, elle doit jouer essentiellement, et plus ou moins efficacement, avec les courants de flot. Sur le jusant, certaines restent plus ou moins longtemps dans la masse d'eau et repartent vers l'aval alors que d'autres rejoignent rapidement un abri au fond ou en rive dans l'attente du flot suivant. C'est ce que l'on appelle le Transport Tidal Sélectif (TTS). Après la reprise alimentaire, la civelle déjà bien pigmentée bascule vers un comportement plus autonome (nage active sur des durées notables) et plus benthique. Selon sa date d'entrée dans l'estuaire et son type de parcours en

phase pélagique, la jeune anguille présente cette bascule comportementale plus ou moins tôt (dès décembre pour les premières arrivées) et plus ou moins haut dans l'estuaire. Le moment et le lieu de cette bascule comportementale a sans doute une influence importante sur le devenir des individus concernés (sédentarisation en zone salée ou saumâtre, taille pour les individus participation à la migration active en eau douce).

Généralement au début du printemps, à la faveur de forts coefficients de marée et de hausses significatives de la température (au-dessus de 11-12 °C), certaines jeunes anguilles, attirées par l'eau douce franchissent la limite de marée dynamique et entament une migration à contre-courant vers l'amont des bassins versants. Cette migration concerne essentiellement des individus de

moins de 30 cm, la taille moyenne et les effectifs des migrants évoluant régulièrement avec la distance à la limite de marée. Elle correspond à une fenêtre printanière et/ou estivale de trois mois environ avec une bonne régularité sur un site donné, cette fenêtre se décalant dans le temps à mesure de l'éloignement de la zone tidale.

Comme en estuaire lors de la phase initiale, les parcours des individus lors de cette phase de migration active sont différents avec un arrêt de migration plus ou moins

précoce, au niveau d'habitats très diversifiés. À partir du moment où elle cesse de migrer (parfois dès la première année, parfois après quelques années), l'anguille présente un comportement plus sédentaire avec une exploration régulière du territoire autour de son gîte, la taille de ce territoire augmentant à mesure de la croissance de l'individu. Des réajustements sur des distances beaucoup plus faibles que lors de la migration initiale ne sont observés que lors d'épisodes particuliers (dégradation de la qualité du milieu, coups d'eau...).



© DIR - Onema

Au final, cette phase dite de montaison comprenant une phase initiale en zone soumise à marée et pour certains individus, une phase de migration active à contre-courant en fleuve ou rivière, conditionne donc complètement la répartition des individus dans un bassin versant. Vont en découler toutes les caractéristiques des anguilles dites «argentées» produites par ce système puisque les niveaux de croissance, de survie, de qualité des individus produits, diffèrent selon les habitats colonisés.

La présence d'un grand nombre d'ouvrages sur nos cours d'eau, des portes à marée installées dans la zone estuarienne ou littorale jusqu'aux barrages implantés en amont, peuvent ainsi constituer des éléments fortement perturbateurs en ralentissant voire en bloquant le phénomène sur une durée plus ou moins longue. La distance parcourue pendant la fenêtre favorable s'en trouve bien sûr affectée avec de plus, des mortalités induites liées au blocage plus ou moins longs des individus en aval des ouvrages (pathologies, prédation et cannibalisme, pêches...). Ces derniers aspects ont été rarement quantifiés jusqu'à présent.



© P. Baran - Onema

Comportement natatoire et implications générales pour la conception des ouvrages

Les jeunes stades d'anguilles, de la civelle à l'anguille jaune jusqu'à 30 cm, adoptent dans leurs déplacements une palette de comportements assez bien connus, qu'il apparaît indispensable de prendre en compte dans une optique d'adaptation des ouvrages à la montaison. L'anguille est attirée par les appels d'eau, mais présente des capacités de nage à contre-courant limitées. Pour les civelles, elles n'excèdent pas 0,1 à 0,2 m/s en nage soutenue, au maximum 0,3-0,5 m/s pour des sprints très brefs tandis que les anguillettes peuvent se déplacer à des



© P. Gomes - Onema

vitesse de 0,3 à 0,6 m/s. En conséquence, les déplacements vers l'amont de l'anguille tirent parti des irrégularités présentes sur le fond ou les berges du cours d'eau : ils sont facilités par l'utilisation des «couches limites» – gradients de vitesse de l'écoulement au contact des obstacles – et sont classiquement entrecoupés de stations dans les abris de la zone rivulaire. Les individus peuvent également recourir à un enfouissement périodique en présence de substrats meubles.

De manière générale, le débit fluvial joue un rôle majeur dans la phase de colonisation : il stimule l'activité migratoire, conditionne l'accès dans le temps à certains tronçons de cours d'eau ou certains ouvrages soumis à marée et peut également dans certaines conditions, être un frein à la progression des migrants.

Ces éléments doivent donc être pris en compte :

- à la fois dans la phase de conception et de positionnement des dispositifs de franchissement, plus efficaces s'ils sont implantés en lisière des appels d'eau majeurs sur un ouvrage donné ;
- mais aussi dans la phase de fonctionnement du dispositif, l'existence d'un débit d'appel significatif à l'échelle de l'axe de migration étant clairement indispensable à



© S. Manné - Onema

l'expression du comportement migratoire et donc à l'utilisation effective des dispositifs de franchissement.

L'anguille possède par ailleurs la faculté **d'escalader les substrats humides présentant des points d'appui et non soumis à une forte courantologie**. La pente franchissable diminue avec la taille des individus (escalade verticale jusqu'à 9 cm). Ces éléments, confortés par des observations en structures expérimentales, sont intégrés dans la conception des passes à brosses ou à plots, avec des pentes n'excédant jamais 1/1, et la présence d'une très faible charge en eau sur les rampes.

Des travaux ont également été menés sur l'attractivité de ces dispositifs. L'importance de l'odeur de l'eau d'appel est connue : une eau transitant par le bac de piégeage amont apporte un plus. Un appel en pied de passe conséquent est également un facteur favorable : le bouillonnement et le bruit associés facilitent le repérage de l'entrée du dispositif de franchissement.

En revanche, peu de travaux ont abordé jusqu'à maintenant la question du nombre de dispositifs spécifiques de franchissement (rampes généralement étroites) à mettre en place par rapport à la taille de l'ouvrage concerné.



© P. Baran - Onema

1.2 – Premiers ouvrages à la mer : quels impacts, quelles solutions ?

Dans les estuaires, la zone soumise à marée, interface instable des milieux maritimes et fluviaux, concentre d'importants enjeux pour les activités humaines – aquaculture, agriculture, pêche, navigation, tourisme. En France, un grand nombre d'ouvrages ont été édifiés, sur l'axe majeur des cours d'eau ou sur leurs tributaires, pour gérer l'alimentation de marais salés endigués, limiter la remontée des eaux salées ou contrôler les submersions régulières dans les territoires amont gérés en eau douce. Souvent de petites dimensions, rarement répertoriés parmi les 60 000 ouvrages que compte actuellement le référentiel national des obstacles à l'écoulement, ils se caractérisent par une grande variété de situations et d'usages. Implantés du bas estuaire, dominé par l'influence marine, jusqu'à la zone fluviale soumise aux marées dynamiques d'eau douce, ils sont de natures très diverses. La typologie dressée dans le cadre du programme R&D distingue ainsi les portes à flot, les clapets, les vannes

levantes (mono ou double blocs), les vannes secteurs, les clapets hydrauliques ou les écluses de navigation – tous ces éléments pouvant apparaître en combinaisons variées. De par leur mode de gestion, tous sont susceptibles d'entraver la libre circulation des jeunes anguilles vers des habitats souvent intéressants – axes et chevelus des cours d'eau, canaux, marais ou zones humides.

Test d'un dispositif d'admission hivernale dans l'estuaire de la Charente

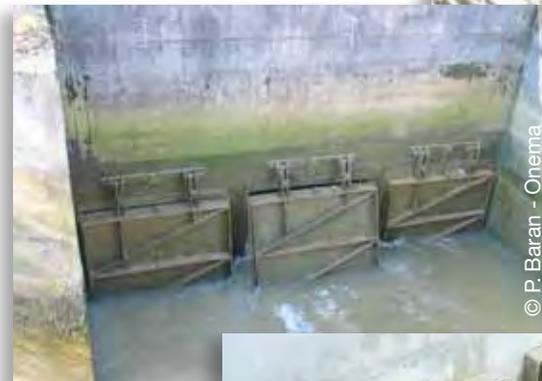
Cette diversité des situations complique évidemment les efforts entrepris pour analyser leurs effets sur la montaison des civelles, et concevoir des solutions pour en réduire les impacts. En France, des expérimentations ont été menées ou sont mises en oeuvre par des associations de protection des migrateurs (Logrami, Migado...), des structures locales (Institution d'Aménagement de la Vilaine, Parc de Brières, Parc du Marais Poitevin),



© P. Baran - Onema



© P. Baran - Onema



© P. Baran - Onema



© M. Chanseau - Onema



© M. Chanseau - Onema

des bureaux d'études (Eco-gea, Fish Pass), des équipes universitaires (Université de Rennes, Agro Rennes) ou par l'Onema.

Dans le cadre du programme R&D, l'une des actions a permis d'évaluer l'efficacité d'un dispositif visant à rétablir la continuité hydraulique amont-aval en autorisant une admission hivernale d'eau salée. L'étude (Ch. Rigaud, Irstea, Ph. Baran, Onema), a été menée à Charras (17), sur un site représentatif du milieu estuarien aval. Implanté sur un tributaire de l'estuaire de la Charente, l'ouvrage est constitué de deux portes à

flots en aval et de vannes à double vantelle en amont. Il contrôle 235 km² de bassin versant et de marais doux. Au cours des hivers 2010 et 2011, les équipes scientifiques ont testé *in situ* une solution technique mise en oeuvre par le gestionnaire de l'ouvrage, l'UNIMA (Union des syndicats de marais de Charente-Maritime) : sur la partie aval de l'ouvrage, la pose d'une cale de bois de dix cm empêchait la fermeture complète de l'une des portes à flots ; en amont, l'admission était réalisée au travers des vannes, selon les envois, soit en surverse soit par le fond.



© P. Baran - Onema

Huit campagnes ont été menées, portant chacune sur quatre marées consécutives – deux diurnes et deux nocturnes. Au cours de ces marées, des échantillonnages biologiques étaient réalisés toutes les vingt minutes, en amont et en aval de l'ouvrage, pour suivre l'évolution du niveau de présence des civelles. Les niveaux d'eau amont et aval ainsi que l'évolution de la salinité étaient suivis en continu. En outre, des dosages de matières en suspension ont été réalisés sur quatre marées.

caractérisent par une forte variabilité en termes de quantité. Cette variabilité d'abondance au cours de la saison, liée à la fois au coefficient de marée et au débit fluvial (figures 2 et 3), plaide pour le maintien d'une possibilité d'admission modérée mais permanente – lequel fonctionnement est d'ailleurs pertinent pour un fonctionnement hydrologique stable de la zone concernée, en comparaison à deux ou trois envois massifs d'eau salée pendant l'année.

Les arrivées de civelles observées en aval des portes à flots sont quasi-synchrones avec l'arrivée du front salé et se présentent sous la forme d'un pic d'abondance entre 2h30 et 1h30 avant la pleine mer. En revanche, elles se

Au cours des 32 marées de l'expérimentation, 52 kg de civelles ont franchi l'ouvrage. Comme attendu, ces franchissements ont eu lieu en majorité de nuit (70%). Des différences significatives ont été observées entre les deux

Figure 2 et 3. Densité de civelles en aval de l'ouvrage en fonction du débit fluvial et du coefficient de marée, pour deux années consécutives (Lamarque *et al.*, 2012).

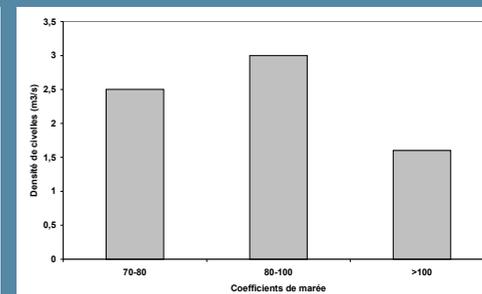
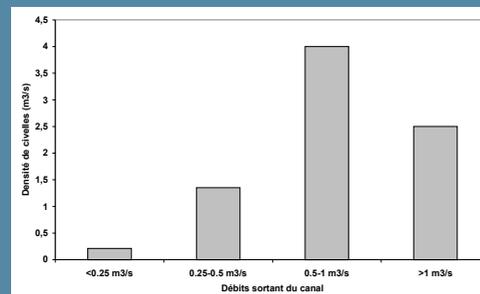
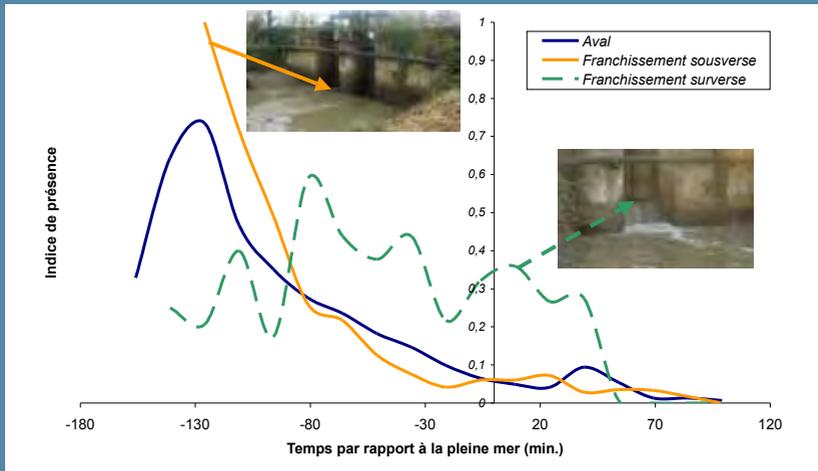


Figure 4. Indices de présence des civelles en aval et au niveau de la vanne amont, en passage par surverse ou par le fond.



modes d'admission sur les vannes situées en amont, comme le montre la figure 4. Lors des envois de fond, les passages de civelles ont été supérieurs de 37 % par rapport aux franchissements par surverse. L'écart est davantage marqué la nuit. Les cinétiques de franchissement sont également différentes : par le fond, le flux est similaire à celui qui se présente en aval, avec un maximum dès la pénétration de l'eau de mer dans l'ouvrage – 75 % des passages s'effectuent en moins d'une heure, entre 1h30 et 2h30 avant la pleine mer. En comparaison, l'admission de l'eau salée par surverse induit un effet retard

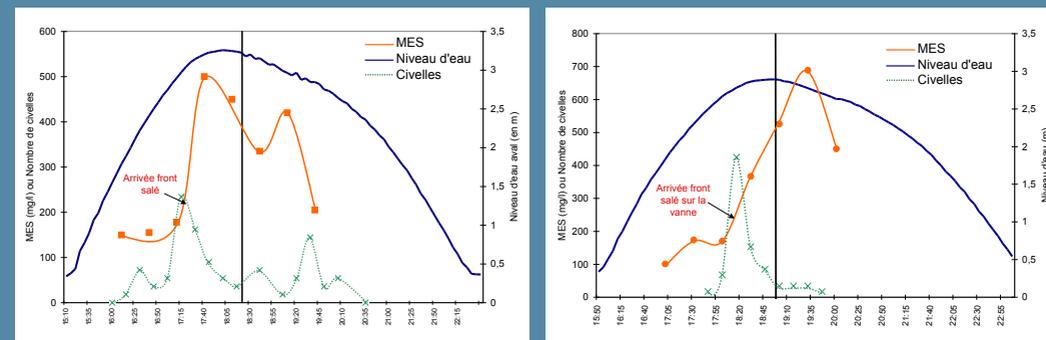
sur les franchissements des civelles, qui ont lieu 30 minutes à une heure après le pic de présence en aval de l'obstacle, et se font de manière plus étalée.

Les observations réalisées in situ ont également permis de collecter des données illustrant l'influence des paramètres environnementaux sur le comportement migratoire des civelles. Celui-ci apparaît étroitement lié à la densité des matières en suspension (MES) : le pic de passage des animaux correspond à l'arrivée du front salé – et donc au début de l'augmentation du taux de MES, comme le montre la figure 5.

Enfin, l'étude a permis de caractériser l'influence de l'aménagement de l'ouvrage – et donc de la modification de son fonctionnement – sur la salinité de l'eau du bief situé en amont de l'ouvrage (7 km de long pour 12 m de large). Dans 50% des cas, les volumes salés admis représentent environ 40% du volume d'eau s'accumulant à l'amont de l'ouvrage lors du flot, avec une augmentation de cinq cm de la hauteur d'eau. De nombreux paramètres influent sur ce rapport : coefficient de marée, conditions météorologiques, mode de gestion de l'ouvrage, auxquels s'ajoute bien sûr le débit amont du canal. Cet apport d'eau douce varie en hiver entre 0,3 et 8 m³/s, pour une médiane de 1m³/s.

Les évolutions en termes de salinité et de matière en suspension (MES) à l'amont de l'ouvrage fluctuent selon les marées. Globalement, dans la très grande majorité des cas, les flux de sels et de MES sont nuls en amont à fin de chaque cycle de marée. Le sel et les sédiments entrés lors du flot repartent au jusant. L'évolution de la salinité de l'eau en amont peut être influencée par les apports d'eau douce. Lorsque ces apports sont très faibles (0,25 m³/s), la salinité de base peut augmenter jusqu'à une valeur trois fois supérieure à la normale. Cette situation apparue très ponctuellement en avril 2011, peut poser certains problèmes avec les usages de l'eau à l'amont.

Figure 5. Passage des civelles et concentrations en MES pour deux marées de jour (Lamarque et al., 2012).



Quelle mise en oeuvre opérationnelle ?

L'étude menée à Charras confirme d'abord la pertinence de ce type d'aménagements permettant l'admission d'eau salée en amont : rapides à mettre en oeuvre, assez peu coûteux, réversibles, ils se traduisent par des passages significatifs de civelles, notamment en phase hivernale. Les observations réalisées conduisent à donner la préférence à une admission limitée mais régulière plutôt qu'à une gestion par admissions massives et ponctuelles.



© P. Baran - Onema

La mise en oeuvre opérationnelle de telles solutions doit s'appuyer sur une analyse de l'ouvrage concerné, de son fonctionnement et des contraintes d'usage du bief amont :

- pour les ouvrages desservant des eaux salées en amont, les admissions peuvent avoir lieu toute l'année : le risque de débordement constitue la seule contrainte éventuelle ;
- pour les ouvrages plus en amont de l'estuaire, la faible salinité de l'eau qui se présente en aval permet le plus souvent des admissions d'eau régulières au moins jusqu'au début de l'été ;
- dans le cas des ouvrages contrôlant une zone amont gérée en eau douce, une analyse doit être menée pour estimer les volumes d'eau salée admissibles, au regard des contraintes d'usage en terme de salinité, de matières en suspension et/ou de débordements.

Dans tous les cas, l'analyse doit également prendre en compte le potentiel des habitats situés en amont pour la colonisation, et identifier d'éventuels problèmes – assèchements réguliers, pollutions aiguës, etc.

Si l'adaptation de l'ouvrage est pertinente et compatible avec ses usages, différentes solutions techniques sont envisageables :

- pour les portes à flots. Petites vannes insérées dans les portes, leurs dimensions étant dictées par le volume d'eau salée admissible en amont. Leur position dans les portes est quant à elle guidée également par les volumes admissibles mais aussi par le comportement des civelles dans la zone concernée et plus particulièrement par leur position dans la masse d'eau (fond ou surface). En cas de difficultés à implanter ces dispositifs, des cales d'une épaisseur de dix cm minimum peuvent être installées afin de bloquer partiellement la fermeture des portes ;
- pour les clapets. Aménagements permettant soit le maintien d'une certaine ouverture lors du flot, soit un retard à la fermeture ;
- pour les écluses. Utilisation hivernale avec phase d'appel d'eau et phase d'admission. Lorsque les portes à flots sont doublées de systèmes de vannage en amont régulant la sortie d'eau douce, ceux-ci doivent être préférentiellement gérés par sousverse. La présence d'un sas entre les deux ouvrages de longueur réduite (<100 m)

ne pose pas de problème de blocage des civelles.

Évaluer l'efficacité d'un dispositif de franchissement : opérations de marquage-recapture

Les travaux visant à évaluer l'efficacité d'un dispositif de franchissement, se heurtent classiquement – à l'image de l'expérience présentée ci-dessus – à la difficulté de connaître précisément la quantité de civelles se présentant à l'aval de l'ouvrage. Pour obtenir des résultats fiables du point de vue quantitatif, l'option la plus solide reste celle du «marquage-recapture» : pour un site équipé, celui-ci consiste à injecter un effectif connu d'animaux marqués en différents points en aval de l'ouvrage, puis à observer le niveau et la cinétique de leur réapparition dans la passe. Une condition essentielle de la réussite de cette stratégie repose sur le faible impact comportemental de la technique de marquage utilisée. Par ailleurs, coûteuses en temps et en énergie, ces méthodes sont surtout indiquées pour les ouvrages estuariens ou proche de la marée, où se trouvent des effectifs d'an-

guilles importants, affichant des comportements nets de migration aux implications fortes pour la suite de la colonisation.



© Irstea

Différentes méthodes ont testées cet effet, selon le gabarit des individus suivis. Depuis 1999, l'association Migado (Lauronce *et al.*, 2011) a marqué par Pit-Tag (code d'identification électronique)

10 300 anguilles de 25-35 cm sur les sites EDF de Golfech et de Tuillières avec un lâcher à 2-3 km en aval. Les recaptures sont très étalées dans le temps (jusqu'à sept ans de décalage) et la probabilité annuelle de recapture varie selon les sites et les années. Ces résultats traduisent plus un comportement de déplacement/prospection au gré des conditions qu'une migration impérieuse.

Dans le cadre du programme R&D, une autre technique a été testée (Christian Rigaud, Irstea, Hilaire Drouineau, Irstea, Philippe Baran, Onema) : celle du marquage par VIE – du nom d'un élastomère de couleur. Adapté à toutes les anguilles de petite taille, jusqu'à 15 cm, ce type de marquage a fait au préalable l'objet de tests qui ont permis d'établir son faible impact comportemental (Imbert *et al.*, 2007). En 2009 et 2010, il a été mis en oeuvre sur trois sites équipés de rampes spécifiques. Deux d'entre eux sont situés dans la zone soumise à marée – Ribérou sur la Seudre, Enfreneaux sur la Sèvre niortaise – et le troisième à quatre kilomètres en amont de la limite de marée : le site de Pas du Bouc sur le canal du Porge.

Les équipes ont mené 16 campagnes réparties sur ces trois sites. Au total, près de 10 000 individus marqués au VIE ont été suivis. Les campagnes ont été centrées sur les trois mois de la fenêtre de migration, identifiée grâce au suivi très régulier effectué sur ces ouvrages par les opérateurs (fédérations de pêche 17 et 33 et le Parc Régional du Marais Poitevin).



© C. Rigaud - Irstea



© C. Rigaud - Irstea

Le même protocole a été reproduit à l'identique pour chaque campagne : 600 individus issus du piège étaient examinés (taille, poids, état sanitaire), puis marqués selon trois lots – l'un remis en pied de passe, les deux autres à une cinquantaine de mètres en aval, en rive droite et en rive gauche. Suite au lâcher, tous les relevés des rampes-piège intégraient le repérage à la lampe UV des individus porteurs d'une marque fluorescente (temps de relevé plus long de 50 % par rapport aux relevés clas-

siques). Ces individus étaient mesurés et examinés avant remise à l'eau très en amont de l'ouvrage. Un lot de contrôle, incluant des individus marqués et non marqués, était maintenu en observation pendant six jours : la mortalité s'est avérée toujours inférieure à 1% pour les anguilles marquées.

Pour chacun des trois sites, l'essentiel des recaptures en amont de l'ouvrage s'est effectué dans un délai de dix jours. La figure 6 illustre l'évolution cumulée des re-

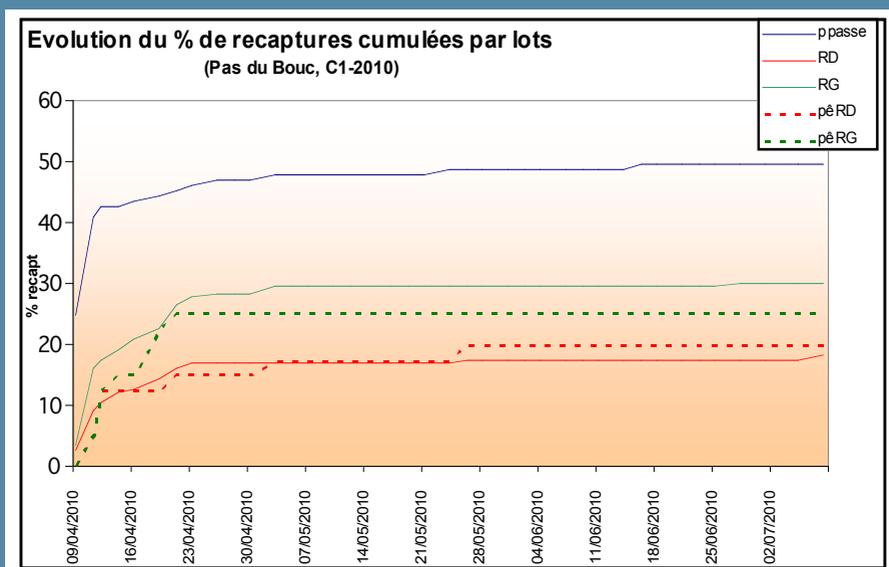
captures en fonction du lieu de lâcher, pour le Pas du Bouc. D'un site à l'autre, la chronologie de réapparition des divers lots est relativement similaire. L'examen des niveaux quantitatifs de recapture des lots aval et leur comparaison par rapport aux lots introduits en pied de passe révèle en revanche une forte variabilité inter et intra-sites, qui s'explique par des contextes de fonctionnement différents, des niveaux de remise en activité non homogènes selon les campagnes et des niveaux d'accessibilité des rampes variant selon les sites et dans le temps.

12 jours, prenait notamment en compte la taille et l'état sanitaire des individus, le lieu du lâcher, les évolutions journalières de la hauteur d'eau, de la température, de la nébulosité et du cycle lunaire. L'étude a permis d'identifier très clairement l'effet du débit fluvial comme facteur facilitant la montaison sur la rampe en accroissant la probabilité d'atteindre le pied de passe pour les lots aval.

Ce modèle sera adapté et testé sur les deux contextes estuariens suivis (Ribérou et Enfrenaux) et pourrait être utilisé dans le cadre d'autres opérations du même site.

Cette action a permis de fournir les premiers résultats quant à l'efficacité des dispositifs de franchissement spécifiques aux jeunes anguilles. Cette efficacité qui varie de 22 à 41 % selon les sites d'études est très liée aux conditions environnementales. Elle a aussi démontré la pertinence de la stratégie de marquage-recapture testée pour l'évaluation de la transparence d'un ouvrage à la montaison, et sa capacité à fournir des données exploitables, apportant des informations nouvelles quant au comportement migratoire dans une perspective d'adap-

Figure 6. Évolution cumulée des recaptures en fonction du lieu de lâcher, pour le Pas du Bouc. (RD : rive droite, RG : rive gauche, p passe : pied de passe) (Rigaud *et al.*, 2012)



tation des ouvrages. Les contraintes inhérentes à la méthode – opérations longues de marquage, puis de repérage au relevé des pièges – amènent cependant à la réserver à quelques sites tests. Au plan méthodologique, la mise en place d'une cage de contrôle, permettant de repérer d'éventuelles mortalités di-

rectes, apparaît indispensable, tout comme l'introduction de lots marqués à l'aplomb immédiat de la rampe. En outre, l'analyse des résultats de telles campagnes est indissociable d'une prise en compte de l'évolution du niveau d'activité migratoire des anguilles pendant les périodes de suivi.

1.3 - Grands ouvrages : faciliter le franchissement

-En amont de la zone estuarienne, sur les grands axes fluviaux, les jeunes anguilles en montaison peuvent rencontrer un autre type d'ouvrages au franchissement problématique et parfois impossible : les grands barrages. Depuis plusieurs décennies, des aménagements ont été mis en oeuvre sur de nombreux ouvrages pour rétablir la continuité amont-aval (passes à bassins, ascenseurs). Assez mal adaptés aux petites anguilles, ces dispositifs ont été complétés par des passes spécifiques équipées de substrats de reptation inclinés (brosses, plots...) irrigués par un faible débit dévalant. Dans le cadre du plan de gestion anguilles, un réexamen du fonctionnement et de l'efficacité de ces passes est apparu indis-

pensable – notamment au vu des conclusions d'une étude néo-zélandaise sur des passes de hauteur importante, mettant en évidence des comportements de retour vers l'aval des anguilles avant leur arrivée au sommet de l'ouvrage.

Passes à reptation : utilité d'un «bassin tampon»

Durant trois saisons de migration (de mai à juillet), une étude du programme R&D (François Travade, EDF R&D) a été conduite par l'association Migado en collaboration avec EDF R&D sur la passe à anguilles de l'usine de Golfech, sur la Garonne. Cet ouvrage de grande hauteur (17 m de chute) a été équipé

en 2002 d'une passe à brosse pour pallier à l'efficacité insuffisante de l'ascenseur à poisson existant. De 2002 à 2008, seule la partie aval de cette passe était mise en place : les animaux étaient capturés puis transférés manuellement à l'amont. À partir de 2008, la passe a été étendue à la totalité de la chute. L'étude visait à caractériser l'efficacité d'un bassin tampon anti-retour ajouté au niveau du tiers inférieur de la pente : la passe «aval», d'un dénivelé de 7 m, est implantée dans la partie basse de l'ascenseur et débouche dans ledit bassin. La passe «amont» fait communiquer le bassin tampon avec le canal



© L. Carry - Migado

de transfert de l'ascenseur (dénivelé de 10 m). Un débit de 2,5 l/s irrigue les deux tronçons de passe. Des bacs de repos sont implantés à intervalle régulier.



© L. Carry - Migado

Pour suivre le comportement de progression des anguilles dans le dispositif et détecter d'éventuelles accumulations dans le bassin-tampon, une méthode de piégeage-marquage des anguillettes à l'aide de transpondeurs a été mise en oeuvre. Trois détecteurs-enregistreurs de transpondeurs ont été implantés le long de la rampe : l'un sur la rampe aval, le deuxième sur la rampe amont en sortie du bassin tampon, le troisième au débouché amont de la passe. En parallèle, un dispositif automatique

de comptage par résistivité, permettant de comptabiliser l'ensemble du flux d'anguillettes franchissant l'obstacle, a été testé en haut de passe.

L'expérience a d'abord confirmé l'utilité du bassin tampon anti-retour : la moitié des anguilles marquées engagées sur la passe amont redescendent – de une à 19 fois selon les individus – dans le bassin tampon. Leur durée de stabulation dans ce dernier reste relativement brève : moins de 40 minutes pour 86 % des individus. Au-

cune accumulation «anormale» n'a été observée dans le bac.

De manière quantitative, les résultats (figure 7) montrent des taux annuels de franchissements comparables à ceux observés jusqu'en 2007 avec le dispositif contraignant de rampe-piège au tiers de la hauteur, qui nécessitait l'intervention manuelle pour relâcher les animaux en amont.

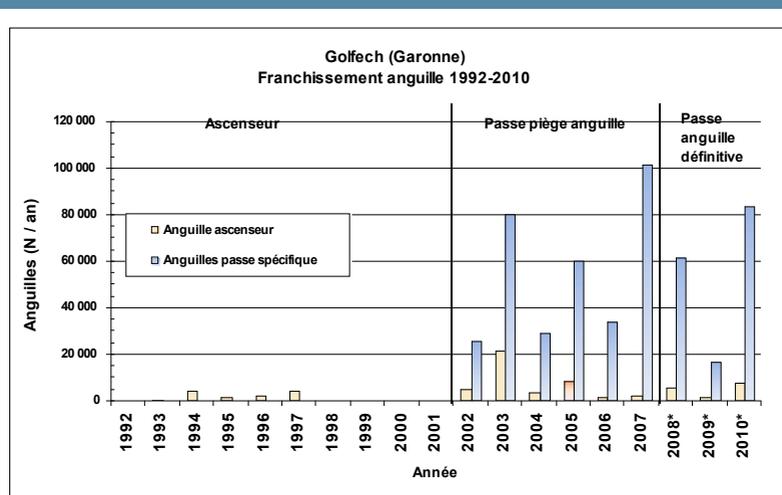
Pour les anguilles marquées, le franchissement de la passe amont prend en moyenne 2h30. La moitié des individus parviennent au sommet en moins d'une heure, et la durée maximale n'excède pas 24 h. Comme sur la passe-piège testée avant 2007, l'essentiel des franchissements ont lieu de nuit : le pic est observé entre 22h et 6h. Cependant, avec le nouveau dispositif de bassin anti-retour, un part plus significative des passages sont diurnes : de 24 % à 54 % selon les années. Cette évolution peut s'expliquer en partie par les allers-retours qu'effectuent les individus engagés dans la passe amont.

Des accumulations d'anguilles ont été observées au sommet de la passe. Elles

peuvent s'interpréter comme la conséquence d'une appréhension des animaux à chuter à l'extrémité de la rampe. En conséquence, les équipes scientifiques ont apporté une modification au dispositif Fish Pass utilisé : la rampe est prolongée à son extrémité supérieure d'une **section descendante**, qui permet aux anguillettes de se laisser glisser à l'amont de l'obstacle. Cet aménagement a permis une réduction très significative des accumulations constatées. Un important écueil constaté par les expérimentateurs concerne enfin la **prédation aviaire**. Celle-ci, opérée notamment par des hérons et des mouettes dans le bac de repos et sur les rampes, rend indispensable la pose de protections grillagées pour l'ensemble du dispositif.

En conclusion, les passes spécifiques constituées de rampes équipées de substrat facilitant la reptation confirment leur pertinence pour le franchissement de barrages, même de hauteur significatives (20-60 m). Pour optimiser leur efficacité, les expérimentateurs préconisent l'adjonction d'un bassin anti-retour dans la partie basse de la rampe, ainsi que

Figure 7. Franchissement du barrage EDF de Golfech (Garonne) par l'anguille de 1992 à 2010.
Jusqu'à 2001 : ascenseur à poissons seul.
2002-2007 : adjonction d'une passe piège spécifique avec transfert manuel.
Depuis 2008 : passe à anguille complète, avec bassin anti-retour.



l'aménagement des conditions de sortie des anguilles à l'extrémité supérieure de la rampe. Enfin, des mesures de protection de l'ensemble du dispositif contre la prédation aviaire sont indispensables.

Comptage des anguillettes sur une passe à brosse : mise au point et test d'un dispositif automatique à résistivité

En parallèle aux comptages manuels réalisés dans les pièges sur le barrage de Golfech, une action connexe

du programme R&D a consisté à mettre en oeuvre et à tester l'efficacité d'un dispositif de comptage automatique à résistivité (François Travade, EDF R&D). Un tel système peut présenter un double avantage : nécessitant moins de main d'oeuvre que le piégeage, il permet d'obtenir une chronologie plus fine du rythme de montaison des anguilles, intéressante à la fois dans une perspective de collecte de données biologiques et d'évaluation de l'efficacité des aménagements apportés à un ouvrage.

La technologie testée à l'amont de la passe à anguilles de Golfech a été développée par

la société ELFES (devenue ELTA) à la demande d'EDF R&D en 1997. Elle a fait l'objet de tests in situ et d'évolutions progressives pour aboutir à une version définitive en 2007. Son principe repose sur le fait que le poisson a une conductivité différente de celle de l'eau : le comptage des animaux et leur calibration s'effectuent de manière automatique par analyse des variations de conductivité entre des électrodes immergées sur le trajet des poissons. Parvenues à l'exutoire amont de la passe, les anguilles glissent dans un bac de réception, à la sortie duquel elles empruntent quatre tubes alimentés en eau (débit 0,1 l/s), équipés d'électrodes. Le dispositif enregistre en continu la température de l'eau, la date et l'heure de chaque passage.

Il distingue deux classes de tailles (paramétrables) et peut être interrogé à distance par GSM.

À Golfech, les tests ont été réalisés durant trois saisons de migration (mai à juillet) de 2008 à 2010. Au terme de l'expérimentation, les résultats confirment l'efficacité du dispositif.

Au total, 38 000 individus ont été recensés en 2010 et 59 000 en 2008, avec des pics journaliers supérieurs à 11 000 individus et des pics horaires de l'ordre de 1 600 individus. Les données collectées permettent de caractériser les plages de migration à l'échelle annuelle (figure 8) ou d'en étudier la chronologie journalière (figure 9).

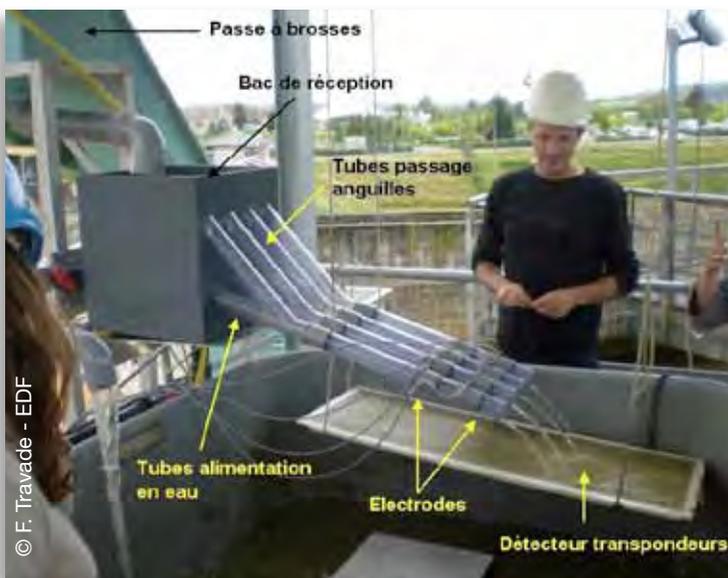


Figure 8. Exemple de résultats du compteur automatique ELTA – chronologie annuelle pour Golfech en 2010.

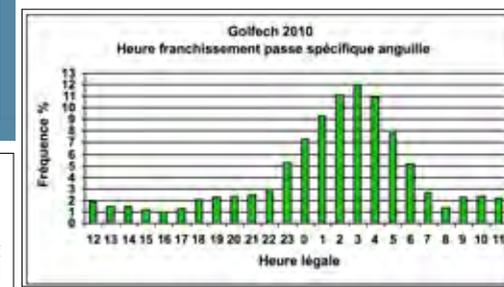
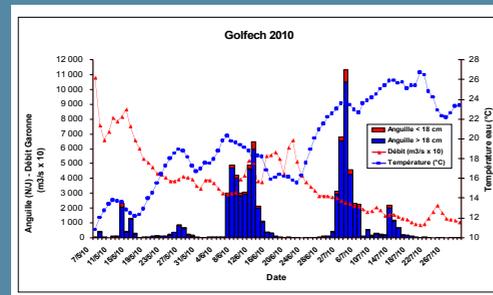


Figure 9. Exemple de résultats du compteur automatique ELTA – Heure de franchissement de la passe de Golfech en 2010.

Le compteur, qui nécessite une alimentation 220 V, demande une surveillance régulière : deux à trois visites par semaine pour contrôler certains paramètres tels que le débit délivré dans les tubes et la qualité des données enregistrées. La validation et le tri des données enregistrées nécessitent également une à deux journées de travail pour une saison de migration. Pour les sites à recrutement important (pics journaliers supérieurs à 5 000 individus), il doit en outre être couplé à un micro-ordinateur, qui sert de stockage de masse des données.

Au plan technique, le compteur s'avère d'abord très fiable : sur des passages de milliers d'individus, plus de 99% ont été détectés (en comparaison au comptage manuel). Il permet une détection partielle (10 % à 90 %)

pour des longueurs comprises entre 125 et 160 mm et totale pour les tailles supérieures. L'analyse biométrique (mesure de la taille et du poids) à partir du signal enregistré par le compteur s'avère également très satisfaisante pour caractériser statistiquement la population migrante. Elle est en revanche trop dispersée pour mesurer de façon précise les très petits effectifs.

Au final, la principale limite de ce dispositif réside donc dans son incapacité à détecter les individus de petite taille, ce qui nécessite de corriger les comptages par des mesures biométriques régulières de façon à évaluer la fraction de la population non détectée. La résolution de cette lacune pourrait faire l'objet d'expérimentations complémentaires sur ce type de compteur.

maintenant faire l'objet d'une mise en oeuvre concertée, aussi large que possible, pour favoriser la colonisation par l'anguille des milieux d'eau douce les plus propices à son développement. Cette colonisation doit être raisonnée à l'échelle du bassin versant : l'estuaire constitue le point d'entrée unique

pour toutes les anguilles qui s'établiront à l'amont par la suite. C'est donc à cette même échelle que doivent être pensées les stratégies à venir. Dans cette optique, quelques réflexions générales ont été apportées (Christian Rigaud, Irstea) lors du séminaire de restitution de novembre 2011.

1.4 Une démarche de priorisation dans la reconquête des axes migratoires

À l'issue de ce premier chapitre, il a été dressé un panorama des outils et solutions expérimentées dans le cadre du programme R&D pour améliorer le franchissement des ouvrages par les jeunes

anguilles en montaison, depuis la zone tidale jusqu'aux barrages implantés en amont. Ces différents dispositifs, testés et validés in situ par les partenaires impliqués dans le programme, doivent



© DR - Onema



Dans la zone soumise à marée, les ouvrages pouvant impacter la pénétration des civelles dans les eaux douces et leur colonisation se caractérisent d'abord, on l'a vu, par une grande diversité de natures (portes, vannes, clapets, écluses...); de positionnement (dans l'estuaire marin ou fluvial, en amont, sur l'axe principal ou un tributaire..); desservant des territoires d'étendue et de nature variée. Du fait de cette grande disparité, la localisation et l'identification des actions à mettre en oeuvre doit d'abord s'appuyer sur un repérage précis des ouvrages existant au sein du BV – identifiant notamment pour chacun le contexte général amont, la présence ou non de civelles, la capacité d'accueil hydraulique du premier bief.

La nécessaire priorisation des actions conduit à envisager des aménagements en priorité sur l'axe majeur du BV avec un débit printanier significatif, et sur les tributaires desservant les habitats les plus favorables. Sur les axes majeurs, il est préconisé de mettre en place des dispositifs permettant des admissions hivernales et printanières dans la zone soumise à marée, ainsi que des rampes pour les barrages situés en amont. Pour les tributaires, selon l'intérêt pour l'anguille des zones amont, l'admission doit être rendue possible dans les limites liées au débit et à la salinité tolérés en amont. Dans tous les cas, la difficulté à prévoir les niveaux de présence des civelles en aval des ouvrages plaide pour le maintien d'une admission régulière durant la fenêtre migratoire – ce qui présente en outre des avantages pour d'autres espèces, et favorise un fonctionnement plus stable de la zone proche de l'ouvrage. De même, il apparaît pertinent de favoriser une gestion progressive et raisonnée des évacuations sur les jusants, de manière à limiter les retours forcés vers l'aval.

Plus en amont, hors zone tidale, l'aménagement des barrages nécessite souvent des solutions spécifiques à l'anguille – dont la taille est en général inférieure à 30 cm pour les individus migrants. La préférence sera donnée dès le départ aux rampes équipées de substrats pluri-taille à faible alimentation en eau. Pour améliorer l'efficacité des dispositifs, il est essentiel de les positionner judicieusement par rapport à l'appel d'eau majeur de l'ouvrage, et de lui assurer un débit d'appel suffisant par rapport à ce dernier. On n'oubliera pas non plus que la restauration de l'espèce avec une embellie des effectifs se traduira, avec une

forte probabilité, par une diminution significative de la taille observée des migrants sur un site fluvial ou rivulaire : ce phénomène devra être intégré dès la conception du dispositif, avec des substrats adaptés à un large spectre de taille de migrants.

Au regard de la diversité des situations, du nombre de partenaires déjà mobilisés, de la nécessité de mutualiser les méthodes et résultats et d'élargir encore la palette de cas étudiés, les équipes engagées dans le programme R&D plaident enfin pour la constitution d'un réseau national dédié sur cette thématique de la montaison. ■





À l'issue de la phase de montaison, les anguilles jaunes se sont établies dans des milieux d'eau douce très variés. De moeurs essentiellement nocturnes, elles y réalisent toute leur croissance (7-10 cm/an en zone estuarienne, littorale ou côtière, 3-4 cm/an dans les cours d'eau de qualité moyenne, 1-2 cm/an dans les cours d'eau à faible productivité). Elles y vivent de 8 à 14 ans pour les mâles, plus présents dans les aval et zones côtières, et de 10 à 18 ans pour les femelles – qui dominent dans l'amont de l'ère de répartition.

Elles y connaissent enfin leur deuxième métamorphose, devenant des anguilles argentées (27-50 cm pour les mâles, de 45 cm jusqu'à 1,20 m et plus pour les femelles). Ce sont ces argentées qui entreprennent le périple qui doit les ramener à leur lieu de naissance, en mer des Sargasses, pour le frai.

Dans les eaux douces, cette migration est appelée dévalaison : les argentées profitent des coups d'eau automnaux et hivernaux pour constituer un flux d'individus migrants de plus en plus conséquent à mesure de la descente vers l'embouchure du fleuve.

Au cours de la dévalaison, comme lors de la montaison, les ouvrages implantés sur le cours des rivières peuvent impacter le déplacement des poissons ou causer des mortalités – en particulier lors du passage des anguilles dans les turbines hydroélectriques. Ce second chapitre synthétise les avancées réalisées dans le cadre du programme R&D pour la compréhension et la réduction de ces impacts à

l'échelle d'un ouvrage. Elle présente les connaissances nouvellement acquises quant au comportement des migratrices au droit des ouvrages, les résultats obtenus pour quantifier les dommages dus au passage dans les différents types de turbines. Elle expose enfin les solutions disponibles pour limiter les mortalités : le développement de turbines adaptées ou de prises d'eau ichtyocompatibles.

2.1 – Comportement des anguilles face à l'ouvrage

Face à un ouvrage hydroélectrique donné, une anguille argentée dispose très souvent de plusieurs voies pour accéder à l'aval. Outre le passage par les turbines, elle peut franchir l'obstacle par les évacuateurs de crue, par des exutoires à poissons s'ils existent ou encore, occa-

sionnellement, par les dispositifs de montaison (passes à poissons). Pour quantifier les dommages que peuvent causer les ouvrages hydroélectriques aux anguilles, il est donc d'abord nécessaire d'estimer la proportion du flux dévalant qui transite par

chacune de ces voies. Cette proportion dépend bien sûr des caractéristiques et de la géométrie propre à chaque ouvrage, mais aussi aux paramètres environnementaux du moment : hydrométrie, turbidité, conductivité et température de l'eau.

Une telle analyse a été menée, dans le cas du programme R&D (Frédérique Bau, Irstea, Michel Larinier, Onema, Philippe Baran, Onema, François Travade, EDF R&D), pour une série de six ouvrages hydroélectriques implantés sur un tronçon de 60 km du Gave de Pau, entre Jurançon et Puyoo, où le débit turbiné varie de 20 m³/s à 110 m³/s. Entre 2007 et 2010, un panel de 192 anguilles a été suivi par radiotélémetrie, de novembre à avril. L'installation

de jeux d'antennes réceptrices au droit de chaque centrale a permis d'identifier avec précision les modes de franchissement des obstacles par les poissons, et d'analyser à quels moments ils ont eu lieu.

Hydrologie et activité migratoire

Il est évidemment impossible de découpler l'analyse des modes de franchissement choisis par l'anguille des paramètres environnementaux qui influencent son comportement. Sur le Gave de Pau, le niveau d'activité migratoire des anguilles a été assimilé au nombre de franchissements comptabilisés à chaque ouvrage par jour de suivi. Durant l'étude, 562 franchissements ont été effectués par les anguilles marquées. Ceux-ci, qui



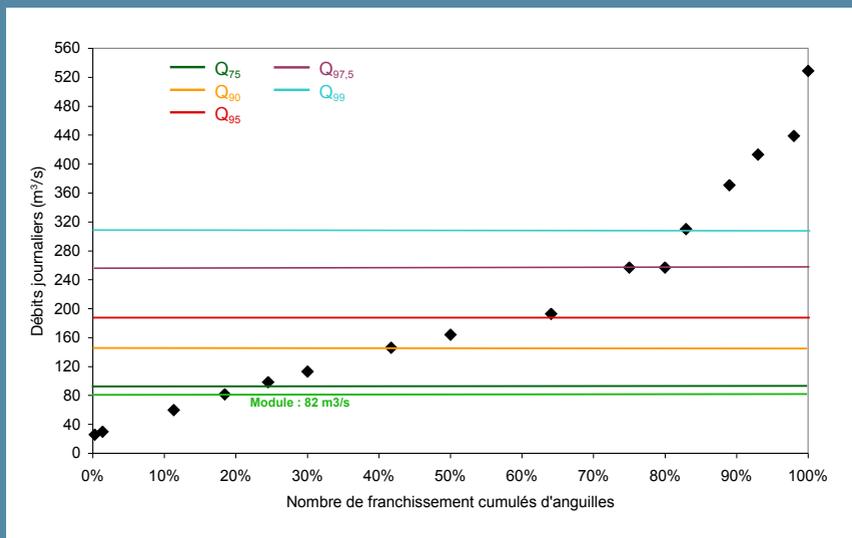
ont lieu sur une large gamme de débits – de 25 m³/s (étiage) à 800 m³/s – apparaissent essentiellement liés aux variations du débit : 83 % d'entre eux ont eu lieu lors de montées d'eau. L'activité des anguilles est ainsi entrecoupée de longues stations où l'animal reste relativement immobile, parfois plusieurs jours. Les franchissements sont essentiellement nocturnes : 83 % ont lieu entre 17h et 8h. Également très liée à l'hydrologie, la vitesse de dévalaison lors des épisodes migratoires est en moyenne de 3 km/h, variable selon les individus et les portions de cours d'eau.

Globalement, les franchissements de barrages se répartissent assez uniformément selon les valeurs de débits journaliers classés depuis le module jusqu'au dernier centile (Q99) (figure 10).

Voies de passage au droit des centrales

Pour les six ouvrages étudiés, les franchissements s'effectuent en majorité (65 %) par les évacuateurs de crue. Les turbines sont la seconde voie de passage (32 %), tandis que les autres possibilités (exu-

Figure 10. Nombre de franchissements cumulés en fonction du débit pour les six centrales étudiées sur le Gave de Pau, répartition par débits classés.



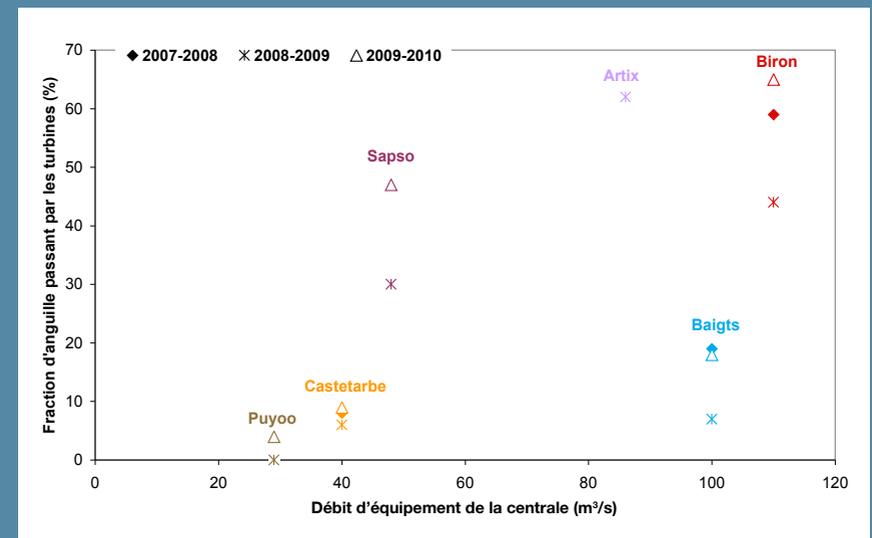
toires et passes à poissons) ne représentent que 3 % du total. Ces valeurs moyennes masquent de grandes disparités d'un ouvrage à l'autre. Ainsi, la part des poissons transitant par les turbines s'étagère entre 2 % et 62 %, comme le montre la figure 11.

de l'ouvrage par rapport au point de lâcher des anguilles.

Un critère déterminant pour la répartition des franchissements entre les différentes voies est bien sûr la répartition des débits entre la prise d'eau (turbine) et les évacuateurs de crue : plus les débits déversés au barrage sont importants, plus la proportion d'anguilles transitant par cette voie est élevée. Une approche statistique par modèle linéaire généralisé (GLM) a permis de proposer des grilles de prises d'eau, ainsi que par la position des voies de franchissement

Les disparités s'interprètent en premier lieu par les différences de débit d'équipement des centrales, de configuration de la prise d'eau et du déversoir, d'espacement inter-barreaux

Figure 11. Part des anguilles transitant par les turbines pour chaque centrale, en fonction du débit d'équipement.



par les anguilles. Ces outils donnent, pour une centrale donnée (figure 12) la probabilité de passage des anguilles par les turbines en fonction des conditions hydrologiques, et en particulier de ce ratio débit déversé au barrage/débit total de la rivière.

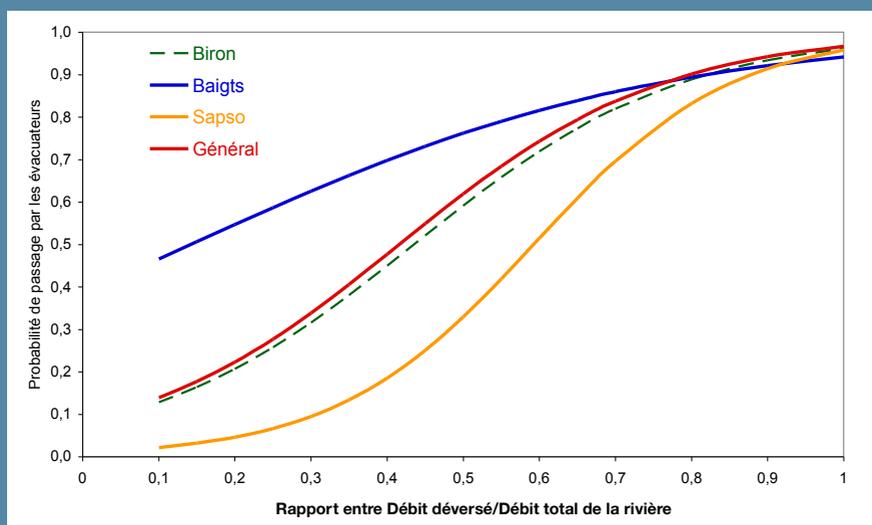
Les différences marquées qui existent d'un ouvrage à l'autre, visibles sur la figure 12, sont liées aux spécificités. Ainsi le seuil très incliné de l'usine de Sapso présente une configuration qui guide les poissons vers les turbines. Celle de Baigts, en

revanche, est équipée de grilles à faible espacement inter-barreaux qui minimisent d'autant le passage des anguilles de grande taille par les turbines.

Dans le cadre d'une action antérieure au programme R&D, la centrale de Baigts a fait l'objet d'une série d'expérimentations pour comparer l'efficacité de différents aménagements. En 2004, la pose d'un exutoire de surface a été testée avec des anguilles de taille moyenne (passant au travers de la grille). En 2005, c'est un



Figure 12. Modélisation de la probabilité de passage par les évacuateurs de crues en fonction du rapport entre débit déversé et débit total.



exutoire de fond qui a été testé, tandis qu'en 2006, une combinaison grille fine et exutoire de surface était mise en oeuvre et testée avec des anguilles de grande taille. Dans les deux premiers cas, une proportion importante (respectivement 60 % et 54 %) des anguilles transitaient par les turbines. En revanche, la troisième configuration permettait de limiter à seulement 8 % le nombre d'anguilles empruntant les turbines. Les observations ont révélé, en présence de la grille fine, que les animaux stationnaient au droit de l'ouvrage en attendant de pouvoir franchir l'obstacle par les évacuateurs de crue, à la faveur d'un coup d'eau. Aucune mortalité par placage sur les grilles n'était observée, alors

que les vitesses d'écoulement s'échelonnaient entre 10 et 40 cm/s. Ces observations confirment l'efficacité des dispositifs de grilles fines. En complément, elles plaident en faveur de la mise en service des exutoires de surface destinés au saumon lors de la période de dévalaison de l'anguille.

De manière générale, les travaux menés sur les six centrales du Gave de Pau ont permis de mieux appréhender le comportement des anguilles argentées en amont des ouvrages hydro-électriques. Confirmant les spécificités de chaque ouvrage, ils ont mis en évidence la part prépondérante des échappements par les évacuateurs de crue. Ils ont enfin proposé des outils

d'estimation de cette fraction en fonction des conditions hydrologiques et des rapports de débits au droit des prises d'eau. Ces données sont précieuses dans une optique d'évaluation des dommages cumulés dus aux turbines hydroélectriques à l'échelle d'un axe de cours d'eau, abordée dans le troisième chapitre de ce document.

Toujours dans le cadre du programme R&D, une approche voisine a été mise en oeuvre sur le linéaire français du Rhin, pour étudier les modes de franchissement d'obstacles en série (E. De Oliveira, EDF-LNHE). Cette action se basait sur la technologie NEDAP de suivi par RFID (identification par radiofréquence) : des anguilles porteuses de puces sous-

cutanées, détectées lors de leurs passages au niveau de six stations équipées d'antennes à longue portée – adaptées à un large cours d'eau comme le Rhin. L'expérience a été entachée, lors des deux premières années, de nombreux problèmes techniques désormais résolus. D'un coût élevé et d'une mise en oeuvre délicate, cette technique devrait cependant permettre, en lien avec les formules de mortalité liées aux turbines, d'estimer le flux d'anguilles dévalantes parvenant à franchir les ouvrages du Rhin français, ainsi que leurs «temps de passage», très variables d'un individu à l'autre. Pour ce faire, il est prévu d'équiper et de relâcher plus de 300 anguilles par an au cours des quatre à cinq prochaines années.

2.2 – Impacts des turbines sur les anguilles dévalantes

Pour évaluer les mortalités induites par un ouvrage donné sur le flux d'anguilles dévalantes, il faut connaître d'une part la fraction de la population migrante qui transite par les turbines – ce qui a fait l'objet de la section précédente – mais aussi le taux de mortalité infligé aux

anguilles par les turbines. Ce taux dépend évidemment du modèle de turbine utilisé sur l'ouvrage. L'obtention de formules prédictives permettant de l'établir est conditionnée à la disponibilité de résultats expérimentaux, peu nombreux au lancement du programme R&D.

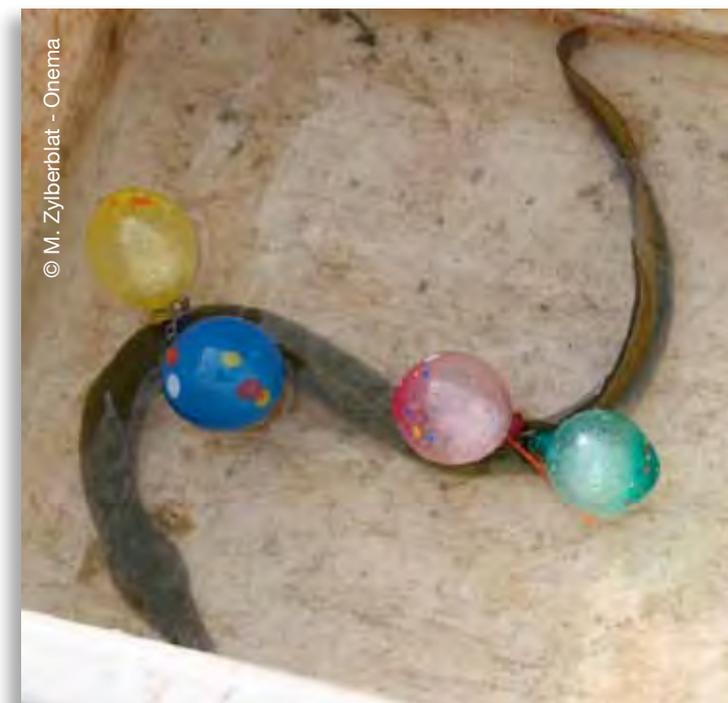


© O. Caillaud - Onema

Étude expérimentale pour les turbines de grande dimension

Une action a été menée en 2009 et 2010 (Éric de Oliveira, EDF R&D – LNHE, Franck Pressiat, CNR Ingénierie) pour évaluer in situ les mortalités induites dans les turbines de grandes tailles de type Kaplan et Bulbe, très présentes sur le parc français et notamment représentatives des aménagements du Rhin et du Rhône.

Les tests ont été menés sur deux turbines Kaplan sur le Rhin (4 et 5 pales) en 2009 et 2010, sous la direction d'EDF, et une turbine Bulbe sur le Rhône, en 2010, sous la direction de la CNR. Dans les deux cas, une technique de marquage par Hi-Z-tag a été mise en oeuvre : des ballonnets autogonflants permettent la recapture des anguilles à l'épuisette en aval de l'ouvrage. Pour chaque test, un minimum de 350 anguilles de grande taille (60 à 90 cm) ont été injectées : 300 dans la turbine à trois endroits différents, et 50 en aval qui servaient de lot témoin. Les animaux recapturés étaient examinés puis mis



© M. Zylberblat - Onema

en stabulation 48h pour le suivi d'éventuelles mortalités différées.

L'expérimentation a bénéficié de très forts taux de recapture (plus de 95 % dans chacun des trois cas) ainsi que des taux de survie très élevés pour les lots témoins : ces deux constats assurent la validité des taux de survie et de blessures obtenus, synthétisés dans le tableau 2.

À Fessenheim comme à Beaucaire, les taux de blessures s'avèrent moins élevés qu'attendu au vu des mesures réalisées sur d'autres sites (USA, Canada, Pays-Bas). En revanche, les résultats pour Ottmarsheim (5 pales) révèlent des taux de blessures significativement

plus élevé. L'interprétation de ces différences demandera de plus amples recherches. La forme et le profil particulier de la roue et des pales peuvent être à l'origine de ces dommages importants. Pour poursuivre l'analyse, des échanges entre le fabricant de turbines et EDF sont programmés.

Etablissement de formules prédictives pour les turbines Kaplan

Compte-tenu de la lourdeur des protocoles expérimentaux, de telles opérations in situ ne sont pas envisageables pour l'ensemble des modèles de turbines présents sur le réseau hydrographique français. Les dommages induits par une turbine

Tableau 2. Mortalités dans les turbines de grande taille : résultats des tests (E. de Oliveira, EDF R&D, F. Pressiat, CNR).

Site	Caractéristiques des turbines/ouvrages			Taux de survie		Taux de blessures	% d'individus indemnes
	Diamètre	Nb de tours/min	H chute	1 heure	48 heures		
Fessenheim Kaplan 4 pales	6,67 m	88,2	15,7 m	93,2 %	92,4 %	7,4 %	92,6 %
Ottmarsheim Kaplan 5 pales	6,25 m	93,7	15,5 m	82,6 %	78,6 %	27,6 %	72,5 %
Baucaire	6,24 m	94	16 m	95,6 %	92,3%	8,4 %	91,6 %



© M. Zylberblat - Onema

donnée peuvent en revanche être approchés par extrapolation des résultats de tests effectués sur des turbines de caractéristiques voisines, ou par le recours à des formules prédictives établies à partir d'expérimentations menées sur d'autres sites.

Ce travail a été mené, dans le cadre du programme R&D (Peggy Gomes, Onema, Michel Larinier, Onema), pour les turbines Kaplan (hors turbines de grande taille), qui équipent une large part du parc de centrales de basse

chute français. Il s'est basé sur les données issues d'expérimentations réalisées sur 24 sites d'Europe et d'Amérique du Nord. Parmi ceux-ci, 71 essais menés sur 15 sites présentaient l'ensemble des données nécessaires. Celles-ci ont été compilées en termes de pourcentage de mortalité, de caractéristiques géométriques des turbines et de conditions de fonctionnement lors des essais. Leur analyse a conduit à établir des formules prédictives par traitement statistique (Voir Gomes et Larinier 2008).



© M. Larinier - Onema

Les expérimentations mettent en évidence des taux de mortalité très variables selon les sites et les turbines. De façon générale, l'importance des dommages augmente avec la taille de l'anguille et la vitesse de rotation de la turbine, et diminue avec le diamètre et le débit nominal de la turbine. Les taux de mortalité varient d'environ 5 à 10 % pour les grosses turbines de basses chutes à plus de 80 % pour certaines petites turbines Kaplan à forte vitesse de rotation.

Trois expressions mathématiques ont été établies à partir des essais effectués à ouverture supérieure à 70 % et en s'appuyant uniquement sur des données facilement accessibles. Ces expressions permettent d'obtenir l'ordre de grandeur de la mortalité (M) en fonction de la taille de l'anguille (TL), du diamètre de la roue (Dr), du débit nominal (Q) et de la vitesse de rotation de la turbine (N). L'application à une soixantaine de turbines Kaplan a permis de valider la cohérence des trois formules. L'une ou l'autre peut être utilisée selon la disponibilité des données concernant les aménagements hydro-électriques diagnostiqués.

Le fait que ni le nombre de pales, ni la hauteur de chute n'interviennent dans ces formules prédictives, s'explique par le nombre limité de tests et surtout l'absence de données pour certaines architectures de turbines Kaplan. La majorité des modèles testés sont à 4 pales, les turbines à 3 et 5 pales ou plus étant en nombre limité. Les turbines de puissances inférieures à 500 kW fonctionnant sous très basses chutes (< 3-4 m) ainsi que des grosses turbines de 10 à 50 MW à débits supérieurs à 150 m³/s fonctionnant sous 10 à 20 m de chute, étaient également sous représentées dans la documentation rassemblée. Ce travail pourra en premier lieu être affiné et complété par l'apport des expérimentations in situ menées sur le Rhône et le Rhin, et présentées *supra*.

Les formules proposées sont néanmoins opérationnelles, et utilisables dès l'instant où les informations recueillies sur les caractéristiques des turbines ont été validées : pour un site donné, elles permettent d'estimer les dommages sur la fraction du stock d'anguilles dévalantes transitant par les turbines.

2.3 – Mise au point de turbines ichtyocompatibles

Une solution pour réduire les impacts des ouvrages hydro-électriques sur les anguilles consiste à disposer de turbines dites « ichtyocompatibles », dont la conception limite ou annule les différents facteurs de dommages infligés aux poissons : chocs sur les pales, coincement entre les pales et le manteau, cisaillement de l'écoulement, gradients de vitesses et de pression.

C'est le cas du groupe turbo-générateur ichtyophile® VLH (*Very low head*) développé par

MJ2 Technologies, turbine de basse chute dont le premier prototype, installé à Millau, a fait l'objet de tests sur la dévalaison de smolts et d'anguilles argentées en 2008. Ces essais ont permis de confirmer les capacités d'ichtyocompatibilité de la VLH, tout en ouvrant des perspectives d'amélioration : des modifications du contour des pales ont été apportées, et le manteau de roue a été modifié pour adopter une forme sphérique qui minore le jeu en bout de pale quelle que soit l'ouverture.



Sous cette nouvelle configuration, la VLH a été testée in situ lors du programme R&D, à la centrale de Frouard (54) sur la Moselle. En fonctionnement depuis février 2010, elle comporte huit pales pour un diamètre de 4,5 m et une puissance électrique maximale de 400 kW. Les tests menés par MJ2 Technologies et Eco-gea ont consisté à injecter en quatre points de la turbine, via un tube de PVC fixé sur le distributeur, un échantillon de 244 anguilles de grande taille (médiane 70 cm) pêchées dans le Rhin. La turbine fonctionnait à pleine ouverture et à pleine puissance. Les poissons étaient récupérés à la sortie dans un filet en polyamide, tendu depuis une plateforme flottante.

L'expérience a confirmé les très bonnes propriétés d'ichtyocompatibilité du système : le taux de mortalité immédiate est nul ; le taux de blessures légères, non léthales à court terme (24 à 48h) est de l'ordre de 2%.

Turbine Alden : une solution prometteuse pour les hautes chutes

Le programme R&D a également contribué (François Travade, EDF R&D) à l'industrialisation d'une solution

ichtyocompatible : la turbine Alden, en cours de développement depuis 1995 aux États-Unis sous l'impulsion du Department of energy. Dotée de trois pales de forme hélicoïdale, cette turbine construite par Voith Hydro est adaptée à des hauteurs de chute importantes, de 6 m à 37 m.

Après le design de la roue, réalisé par modélisation numérique, des tests biologiques ont été réalisés au laboratoire d'hydraulique d'Alden sur un prototype (échelle 1 : 3,25) dans lequel ont été injectés 40 000 poissons de six espèces, de tailles comprises entre 36 et 425 mm. La survie des poissons, extrapolée à une turbine échelle 1, a été évaluée à 97 % - 100 %. Pour l'anguille d'une longueur de 250 à 430 mm, le taux de survie était de 100 % sur le modèle. En revanche, il a été jugé difficile d'extrapoler la survie à des individus de taille représentative du stock dévalant (600 à 1 000 mm).

À la suite de ces résultats biologiques satisfaisants, le design final de la turbine a été réalisé de 2008 à 2010 par le constructeur Voith Hydro avec un triple objectif : optimiser le rendement énergétique de la turbine, maintenir son ichtyocompatibilité et minimiser les coûts de fabrication. Les modélisations numériques et

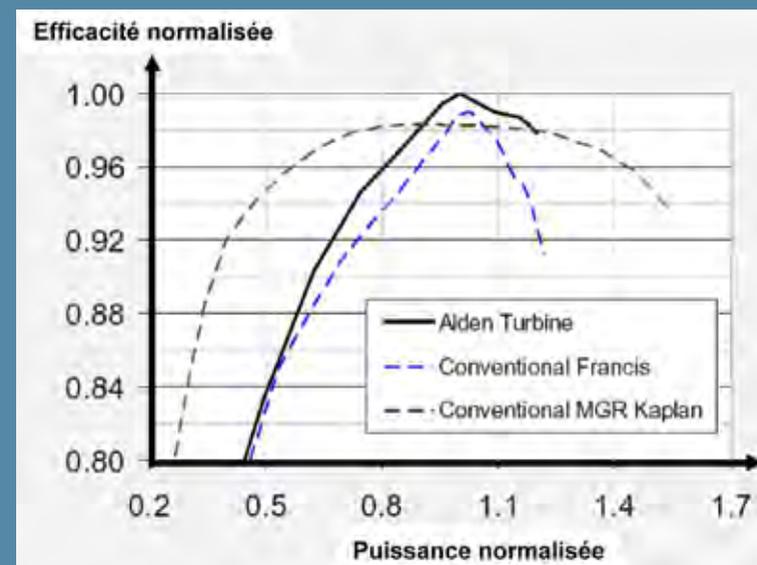
les tests sur modèle physique (échelle 1 :8,7) ont conduit au design industriel de la turbine optimisée pour les caractéristiques suivantes : diamètre de la roue 3,7 m, débit 45 m³/s, hauteur de chute 28 m, vitesse de rotation 120 tr/mn, puissance 11 MW.

Le rendement de cette turbine est de 93,6 %. Ces performances n'ont rien à envier aux turbines conventionnelles. La turbine Alden affiche une meilleure efficacité que la turbine Francis, mais une gamme d'utilisation moins large que la turbine Kaplan (figure 13).

Des tests biologiques *in situ* sont programmés par l'EPRI sur une turbine de taille similaire à celle optimisée par Voith Hydro. Les tests consisteront à mesurer la survie de poissons de diverses espèces et longueurs, injectés dans la turbine.

La fonctionnalité de la turbine Alden pour l'anguille ne pourra cependant être précisée qu'après 2015, à l'issue des tests biologiques in situ réalisés sur des individus de taille représentative du stock dévalant (longueur de 600 à 1 000 mm).

Figure 13. Performances comparées des turbine Alden, Francis et Kaplan.



La principale limite au déploiement de la turbine Alden tient à son diamètre, supérieur à celui des turbines classiques pour des caractéristiques de chute et de débit équivalentes. Il ne sera donc pas possible de remplacer des installations existantes sans modifications lourdes du génie civil. En conséquence, cette technologie apparaît davantage indiquée pour la construction de nouvelles centrales, l'augmentation de la capacité de centrales existantes, le turbinage des débits réservés ou le turbinage d'exutoires de dévalaison. Son utilisation est théoriquement possible pour des hauteurs de chute comprises entre 6 m et 37 m et pour des débits compris entre 14 m³/s

et 57 m³/s. Pour l'anguille, les mortalités correspondant à ces gammes de chutes et débits devront être précisées par des tests *in situ*.

Dans des gammes de fonctionnement très différentes, la turbine VLH et la turbine Alden apparaissent aujourd'hui comme deux alternatives pertinentes aux technologies existantes, dans une optique de réduction des mortalités induites sur les stocks dévalants par l'industrie hydroélectrique. Un important effort de développement reste toutefois à réaliser pour proposer d'autres modèles de turbines ichtyocompatibles, adaptées aux chutes intermédiaires.

2.4 – Prises d'eau ichtyocompatibles

En parallèle aux actions menées pour le développement de turbines à faibles mortalités, le programme R&D a également étudié les solutions consistant à empêcher l'accès des anguilles aux prises d'eau des turbines. Un dispositif de répulsion à infrasons développé par *Profish Technologies* a par exemple été testé, deux années durant, au moyen de 150 anguilles équipées d'émetteurs, sur deux sites aux configurations très différentes sur le Gave de Pau.

Sans succès : les résultats (F. Bau, Irstea) n'ont montré aucune différence significative dans le comportement des anguilles, en présence ou non des infrasons. À défaut de solutions répulsives efficaces, l'option la plus solide pour arrêter les anguilles et les empêcher de passer par les turbines reste la mise en place de grilles à faible espacement libre entre barreaux, associées à un ou plusieurs exutoires permettant leur transit sans dommage à l'aval.

En 2008, une étude (Courret et Larinier) a permis de définir les bases de conception et de dimensionnements de telles grilles à partir du retour d'expériences menées en France comme à l'étranger.

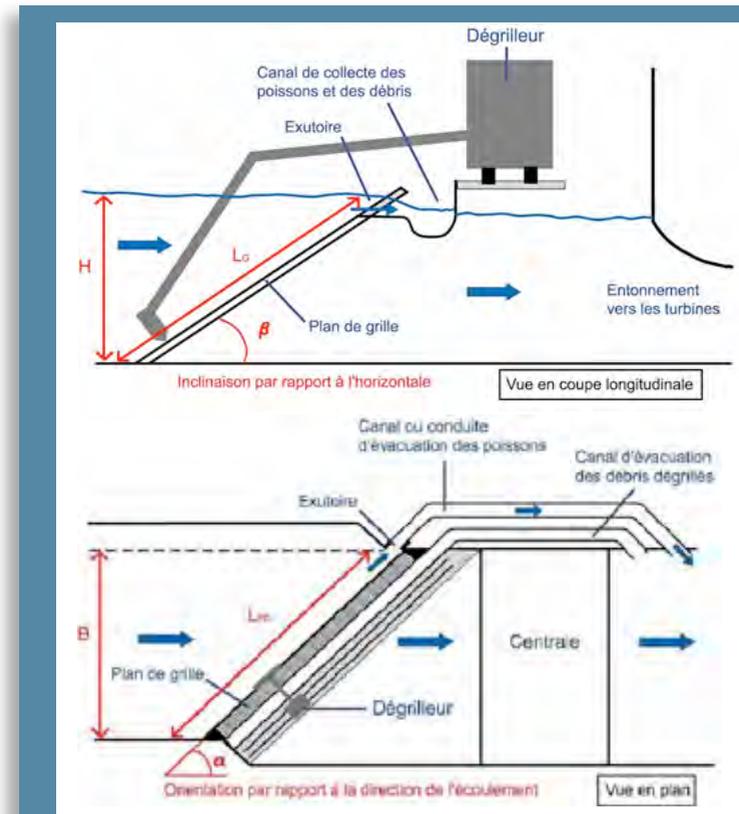
Pour guider les poissons vers un exutoire, il est préconisé d'implanter :

- soit un plan de grille per-

pendiculaire à l'écoulement, fortement incliné par rapport à l'horizontale, un ou plusieurs exutoires selon la largeur de la prise d'eau étant alors positionnés au sommet ;

- soit un plan de grille perpendiculaire à l'écoulement, fortement incliné par rapport à l'horizontale, un ou plusieurs exutoires selon la largeur de la prise d'eau étant alors positionnés au sommet ;
- soit un plan de grille vertical, orienté par rapport à la direction de l'écoulement, l'exutoire étant alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille (figure 14).

Figure 14. Schéma de principe de prises d'eau ichtyocompatibles, inclinée (en haut) ou orientée (en bas). Source (Courret et Larinier, 2008).



Il est également recommandé d'adopter un espacement libre entre barreaux de l'ordre de 1,5–2 cm, en respectant une vitesse normale au plan de grille maximale de 50 cm/s pour ne pas induire de placage des poissons sur la grille.

Ces critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles constituent des modifications importantes par rapport à la conception conventionnelle et sont susceptibles d'avoir des répercussions notables sur les pertes de charge au passage des plans de grille – donc sur la productivité des ouvrages – ainsi que sur leur entretien (dégrillage). Dans le cadre du programme R&D, une action (Laurent David, Institut P', Ludovic Chatellier, Institut P', Dominique Courret, Onema, Michel Larinier, Onema) a consisté à poursuivre ce travail de conception de prises d'eau ichtyocompatibles en vue de leur mise en oeuvre opérationnelle, avec un triple objectif :

- caractériser les pertes de charge au passage des plans de grille à faible espacement libre entre barreaux dans des configurations ichtyocompatibles (grilles très inclinées ou

orientées) afin de valider ou d'adapter les formules existantes, et à défaut d'en proposer de nouvelles ;
- caractériser les vitesses d'écoulement à l'approche des plans de grille ichtyocompatibles afin de vérifier que les critères de conception préconisés se traduisent par les conditions hydrauliques recherchées pour les poissons dévalant, et le cas échéant de les affiner ;

- préciser les critères de positionnement et d'alimentation en débit des exutoires dans chaque configuration. Pour ce troisième objectif, l'étude est encore en cours. Ce travail a été mené par une approche expérimentale sur modèle réduit physique, tout d'abord dans un canal tracté au sein d'un bassin, puis dans une veine d'eau hydraulique construite spécifiquement dans les locaux de l'Institut P', à Poitiers. Les plans de grille ont été reproduits à l'échelle 1/2. Pas moins de 88 configurations ont été testées en combinant 11 dispositions de plans de grille – inclinées par rapport à l'horizontale ou orientées par rapport à la direction de l'écoulement – , 4 espacements libres entre barreaux (de 10 à 30 mm) et deux

profils de barreau (rectangulaire PR et hydrodynamique PH). L'influence du colmatage partiel du plan de grille sur les pertes de charge et les vitesses d'écoulement a également été étudiée via l'ajout de plaques perforées. Les pertes de charge ont été mesurées à partir des différences de niveau d'eau amont/aval du plan de grille. Les vitesses d'écoulement ont été caractérisées à partir de profils le

long des plans de grille par sonde ADV (*Acoustic Doppler velocimetry*) et mesures laser.

Les résultats expérimentaux de pertes de charge, ont montré que la formule de calcul des pertes de charge mise au point par Meusburger (2002), la plus complète jusqu'à présent disponible dans la littérature, n'était pas adaptée aux plans de grilles ichtyocompatibles.



© S. Raynald - Onema

Deux nouvelles formules pour calculer les pertes de charge, correspondant respectivement aux plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale, ou orientés par rapport à la direction de l'écoulement, sont proposées. Elles sont données pour mémoire dans l'encadré.

L'étude a également permis une caractérisation fine des champs de vitesse le long

des plans de grille, conduisant à préciser les critères de vitesse à l'approche des plans de grille pour éviter les risques de placage des poissons et obtenir un guidage optimal des poissons vers l'exutoire. Pour ce dernier critère, il est recommandé de conserver un angle $\beta \leq 26^\circ$ (pour les plans de grille inclinés) ou $\alpha \leq 45^\circ$ (pour les plans de grille orientés).

Une étude complémentaire est menée à l'Institut P', en partenariat entre l'Onema et les hydroélectriciens (SHEM, CNR, EDF, FHE), pour préciser les critères de positionnement et d'alimentation en débit des exutoires dans chaque configuration. La présentation finale est prévue au premier semestre 2013. Les résultats de ces travaux permettront aux services de l'Etat et aux

industriels de mieux appréhender les dispositions techniques à apporter aux installations pour contribuer à la sauvegarde de l'anguille. ■

Formule pour calculer les pertes de charge

Loi de perte de charge pour les plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement

$$\Delta H = \frac{V^2}{2g} * \left[A * \left(\frac{O}{1-O} \right)^{1.6} * \left(1 + C * \left(\frac{90 - \alpha}{90} \right)^{2.35} * \left(\frac{1-O}{O} \right)^3 \right) \right]$$

Avec V la vitesse débitante amont, A et C des coefficients fonction du profil de barreau valant respectivement 2,89 et 1,69 pour PR et 1,70 et 2,78 pour PH. Loi pour les plans de grille verticaux ($\beta = 90^\circ$) et orientés par rapport la direction de l'écoulement ($30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), applicable sur une gamme d'obstruction O de 0,35 à 0,6, pour un rapport largeur sur profondeur du barreau b / p voisin de 0,125, pour un rapport espacement libre sur largeur du barreau e / b compris entre 1 et 3.

Loi de perte de charge pour les plans de grille orientés par rapport à la direction de l'écoulement

$$\Delta H = \frac{V^2}{2g} * \left[A * \left(\frac{Ob}{1-Ob} \right)^{1.65} * \sin^2(\beta) + C * \left(\frac{Oent}{1-Oent} \right)^{0.77} \right]$$

Avec V la vitesse débitante amont, A un coefficient fonction du profil de barreau valant 3.85 pour PR et 2.10 pour PH, C un coefficient fonction de la forme des entretoises et autres éléments transversaux, assimilable à un coefficient de traînée (1.79 pour des entretoises cylindriques). Loi pour les plans de grille perpendiculaires à l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$) et inclinés par rapport à l'horizontale ($15^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$), applicable sur une gamme d'obstruction globale O de 0.35 à 0.6.



© D. Courret - Onema



Les résultats scientifiques présentés dans ce qui précède constituent des avancées significatives pour la compréhension des impacts causés au stock d'anguilles dévalantes à l'échelle d'un ouvrage. De même, les solutions explorées dans le cadre du programme R&D – turbines et prises d'eau ichtyocompatibles notamment – constituent autant d'options opérationnelles pour limiter ces mêmes impacts à l'échelle d'un ouvrage.

La mise en oeuvre de ces éléments de réponse doit bien sûr être décidée à la lumière d'une analyse globale. C'est l'échelle de l'axe du cours d'eau que peuvent être estimés les impacts cumulés des ouvrages – c'est à dire la fraction réelle du flux d'anguilles qui parviennent, pour un bassin versant donné, à rejoindre l'estuaire. C'est dans une analyse intégrée que devront être décidés, priorisés et mis en oeuvre les aménagements locaux nécessaires à l'atteinte des objectifs du plan de sauvegarde. C'est encore à l'échelle de l'axe du cours d'eau que peuvent être envisagés, planifiés – et chiffrés en termes économiques – des arrêts ciblés du turbinage lors des pics de dévalaison.

Ces approches globales, complément essentiel des approches locales, constituent l'objet de ce troisième chapitre.

3.1 – Impacts cumulés : une méthode de diagnostic prometteuse

Les avancées réalisées dans la cadre du programme R&D pour l'évaluation des impacts à l'échelle de l'ouvrage – comportement des anguilles face à l'ouvrage, fraction des individus transitant par les turbines, taux de mortalité induit par une turbine donnée – ouvrent la voie à une quantification des dommages subis par les populations d'anguilles à l'échelle d'un axe de cours d'eau. Cette quantification doit s'appuyer sur la connaissance de l'activité migratoire sur le cours d'eau considéré ; l'inventaire des ouvrages qui y sont implantés et de leurs configurations respectives.

Dans cette perspective, une action du programme R&D (Peggy Gomes, Onema, Michel Larinier, Onema, Philippe Baran, Onema) a permis de développer et d'appliquer sur des cas concrets une approche en modélisation, destinée à évaluer le taux d'échappement des anguilles à l'échelle d'un axe de migration.

Conçue comme un outil de diagnostic et de priorisation

des actions, cette méthode repose sur « l'emboîtement » de trois modèles :

– un modèle permettant de connaître, sur une base journalière, le **flux d'anguilles argentées se présentant au droit d'un ouvrage**. Une telle estimation peut être réalisée par croisement de paramètres environnementaux (météorologie, hydrologie, turbidité...). Cette approche ambitieuse a été mise en oeuvre dans le cas de la Loire ; elle est décrite à la section 3.2 du présent document. Dans le cadre du modèle intégré présenté ici, c'est une autre approche qui a été privilégiée : celle qui permet de relier l'activité migratoire des anguilles à la gamme de débits caractéristiques, sur la base des données relatives aux 562 franchissements d'ouvrages suivis sur le Gave de Pau. L'analyse (figure 10, section 2.1) révélait une équipartition des passages entre les valeurs de débit classés Q75, Q90, Q95, Q97,5 et Q99. Ces données hydrologiques présentent l'intérêt d'être plus facilement accessibles, dans le cadre d'une mise en

oeuvre à grande échelle, que les paramètres expérimentaux cités plus haut ;

- un modèle de **répartition des flux d'anguilles au droit des prises d'eau des installations hydroélectriques**. Celui-ci est issu des traitements statistiques (modèle GLM) de 476 franchissements d'ouvrages hydroélectriques sur le Gave de Pau en fonction du rapport débit déversé au barrage sur débit total du cours d'eau (figure 12, section 2.1). La probabilité de passage des anguilles

par les turbines, en fonction de ce rapport, dépend bien sûr de la configuration de la centrale étudiée et de son degré d'équipement. Chaque type d'ouvrage nécessite donc un modèle particulier. Globalement, les ouvrages présentant un seuil incliné par rapport à l'écoulement apparaissent les plus préjudiciables aux anguilles. Parmi les ouvrages bâtis perpendiculairement à l'écoulement, la proportion d'individus transitant par les turbines croît avec la taille de la prise d'eau latérale ;



- enfin, un modèle d'estimation des dommages potentiels subis par la part du flux migrant qui transite par les turbines. Celui-ci se base sur les formules prédictives mises au point grâce aux travaux de synthèse et analyses présentés dans la section 2.2 : le traitement de 29 tests issus de la littérature scientifique a permis de proposer une relation donnant le taux de mortalité en fonction de la taille de l'anguille et de certaines caractéristiques de la turbine : diamètre, vitesse de rotation, débit nominal.

L'emboîtement de ces trois modèles, tel que schématisé sur la figure 15, permet d'estimer les dommages induits par un ouvrage donné.

Méthode de mise en œuvre et premiers résultats

Les équipes scientifiques du programme R&D ont proposé une méthodologie pour la mise en oeuvre de cet outil. La première étape consiste à collecter toutes les données nécessaires : hydrologie du cours d'eau, caractéristiques des ouvrages et population d'anguilles colonisant le bassin.

Les données hydrologiques proviennent de la Banque Hydro, sur la base des débits journaliers de la période de dévalaison des anguilles argentées – à définir à partir des connaissances locales. Les données doivent être recalculées au droit de chaque

ouvrage au prorata de la surface du bassin versant amont. Pour chaque année où les données sont disponibles, les valeurs caractéristiques des débits classés peuvent être calculées. Les données relatives aux aménagements électriques doivent être collectées, pour chaque ouvrage, sur la base des informations disponibles auprès des services de l'État, puis complétées et validées par une enquête auprès des exploitants. Enfin, les informations relatives aux populations d'anguilles du cours d'eau et la répartition des abondances d'anguilles argentées doivent être estimées dans le bassin versant, soit en considérant les surfaces des bassins, soit le linéaire de cours d'eau.

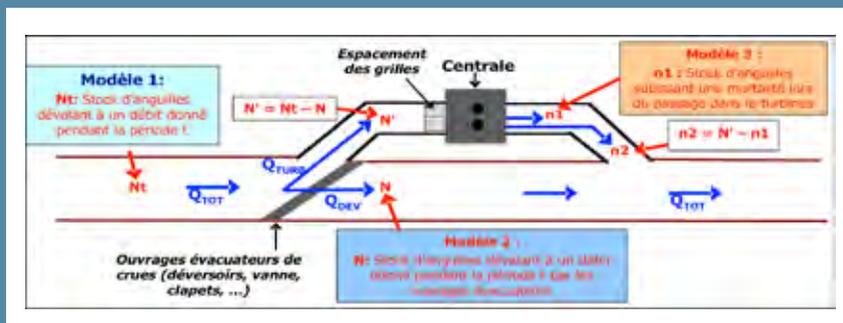
Cette phase de collecte d'informations peut nécessiter 15 à 30 journées homme de travail pour des axes comprenant 15 à 25 ouvrages.

La mise en oeuvre du modèle s'effectue d'abord à l'échelle de chaque ouvrage : pour chaque valeur de débits classés annuelle, la fraction d'anguilles dévalant d'une taille donnée (modèle 1 de la figure 15) est répartie entre

turbines et évacuateurs de crues (modèle 2). La fraction transitant par les turbines est ensuite affectée d'un taux de mortalité, selon le modèle 3. Pour estimer le taux d'échappement à l'échelle de l'axe, les taux d'échappement de chaque ouvrage sont mobilisés de manière itérative : le stock d'anguilles se présentant en amont de l'ouvrage N est la somme du stock d'anguilles ayant franchi avec succès l'ouvrage N-1 et du stock d'anguilles issues des habitats situés dans le segment de cours d'eau entre les deux ouvrages. Cette phase de modélisation peut représenter 5 journées-homme de travail pour un axe comprenant 15 à 20 ouvrages.

Cette méthode est la seule validée à ce jour pour estimer, pour une année et une période donnée, un taux d'échappement à chaque ouvrage ainsi qu'un taux global correspondant à la fraction d'anguilles ayant survécu aux impacts cumulés de chaque ouvrage. Dans le cadre du programme R&D, elle a été appliquée à un cours d'eau du Sud-ouest équipé de 26 ouvrages en

Figure 15. Dommages cumulés à l'échelle de l'axe d'un cours d'eau : emboîtement des modèles prédictifs pour un ouvrage.



considérant une répartition uniforme des anguilles en fonction de la taille du bassin versant. Les taux d'échappement globaux varient entre 33 % et 66 % selon les années, avec une moyenne à 49 % - les différences inter-annuelles pouvant être interprétées au regard des variations de l'hydrologie. De telles informations sont précieuses pour former un diagnostic à l'échelle d'un cours d'eau, comparer les impacts respectifs des différents aménagements et prioriser les actions à mettre en oeuvre pour améliorer le taux d'échappement des

anguilles. La méthode actuelle se base cependant sur des suivis d'anguilles dévalantes tous issus du Gave de Pau, caractérisé par un régime hydrologique pluvio-nival. Dans d'autres contextes, les périodes et débits caractéristiques favorables à la dévalaison sont susceptibles d'être différents. Pour une mise en oeuvre optimale du modèle, il est donc recommandé d'exploiter au maximum les informations disponibles localement sur le rythme de dévalaison des anguilles.

3.2 – Anticiper les périodes de dévalaison : vers une gestion adaptée du turbinage

Au-delà du diagnostic des impacts cumulés des ouvrages, les analyses menées à l'échelle de l'axe d'un cours d'eau contribuent à préciser les conditions techniques et économiques de la mise en oeuvre d'arrêts ciblés du turbinage, au moment des pics de dévalaison des anguilles. Cette solution, complémentaire aux aménagements d'ouvrages déjà cités, apparaît comme un levier intéressant pour

l'atteinte des objectifs nationaux de restauration des stocks d'anguilles. Sa mise en oeuvre ne peut cependant s'envisager qu'au regard des enjeux économiques et sociaux liés à la production d'hydroélectricité. Les durées acceptables d'arrêt de turbine devront être définies de manière consensuelle, pour chaque opérateur et chaque ouvrage. Dans tous les cas, elles devront être mises à profit pour autoriser

les meilleurs taux d'échappement d'anguilles argentées. Dans cette optique, la prévision des pics d'activité migratoire s'impose comme un enjeu essentiel.

Migromat® : des alarmes trop tardives

Des éléments de compréhension du rythme de dévalaison ont été apportés dans le cadre des suivis réalisés sur les six stations du Gave de Pau, présentés en section 2.1. Mais d'autres approches ont été mises en oeuvre par les équipes du programme R&D. C'est le cas des tests effectués (Kieran McCarthy, Ruairi MacNamara, Ryan Institute and School of Natural Sciences, Michel Larinier, Onema, François Travade, EDF R&D) en Irlande sur la

rivière Shannon, pour évaluer l'efficacité du biomonitor Migromat®. Le principe de ce dispositif repose sur le fait que des anguilles argentées maintenues en captivité dans des bacs, alimentés par l'eau du cours d'eau étudié, présentent une activité accrue lors des pics de dévalaison. Il a été mis en oeuvre de septembre 2008 à mars 2010 à Killaloe, en amont d'une pêcherie professionnelle comprenant 34 filets servant à une opération de capture-transport, dont huit «filets index» manoeuvrés quotidiennement. Une trentaine d'anguilles étaient maintenues dans deux bacs de 5 m³, équipées de transpondeurs pour suivre en temps réel leur niveau d'activité via un programme informatique. Lorsque les signaux étaient



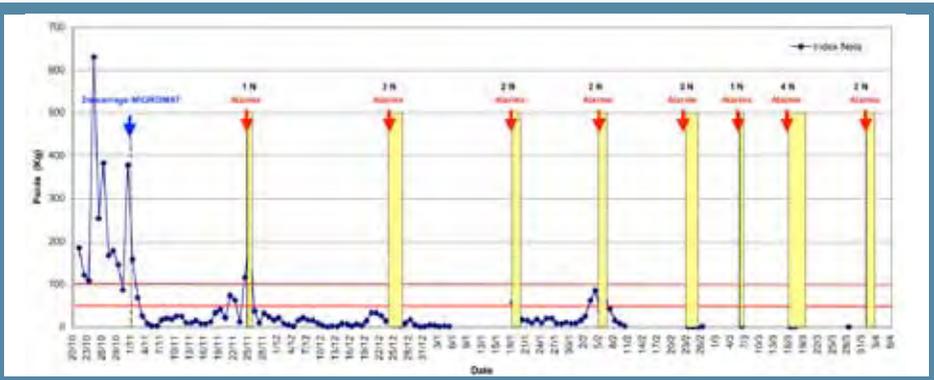
considérés comme caractéristiques d'un pic de dévalaison, un message d'alerte était généré par e-mail.

L'expérience a consisté à comparer les alarmes ainsi générées aux pics de dévalaison mesurés par la pêche, et à quantifier la fraction de stock dévalant qui aurait échappé à des turbines arrêtées pendant la nuit (de 18h à 7h) lors des périodes d'alarmes. Durant les deux saisons de migration, l'étude a été conduite sur une période continue de 60 jours minimum.

À l'arrivée, le bilan est contrasté. Selon les modèles d'évaluation, le Migromat® aurait permis l'échappement de 14 à 29 % du stock dévalant s'il avait été utilisé comme pilote d'arrêt de turbines. Ce taux est insuffisant au regard

des objectifs d'échappement requis dans les plans de gestion de l'anguille, réduction de 75 % des différentes sources de mortalité. Cette efficacité limitée du dispositif provient essentiellement d'une détection tardive des pics migratoires : les alarmes générées interviennent bien au cours des pics (figure 16) mais alors que ceux-ci sont déjà en cours, parfois depuis plusieurs jours. Ce constat a conduit l'Onema à conclure que le Migromat® ne peut constituer, en l'état actuel de son efficacité, un outil opérationnel de manoeuvre des turbines agréé par l'administration en France. En comparaison, les dires des pêcheurs professionnels s'avéraient bien plus efficaces pour anticiper les plages de dévalaison du migrateur.

Figure 16. Captures Killaloe et alarmes - MIGROMAT 2008-2009.



Pêche expérimentale : une source d'informations pertinente

Une autre approche, plus lourde mais plus concluante, a été mise en oeuvre (Laurence Lissalde-Bonnet, EDF-CIH) sur la Dordogne afin d'étudier localement les rythmes de dévalaison de l'anguille. L'expérimentation a été conduite dans le canal d'aménée de l'usine hydro-électrique de Mauzac. Elle a consisté à déterminer la faisabilité d'une pêche d'échantillonnage visant à acquérir des connaissances sur les flux migratoires d'anguilles, ainsi que sur l'influence de paramètres environnementaux tels que le débit, la température, la conductivité, la turbidité ou le cycle lunaire.

Le dispositif, conçu avec l'appui de pêcheurs professionnels, reposait sur le principe du filet «guideau» des pêcheries commerciales, actionné depuis une plate-forme flottante amarrée à la berge. Mis à l'eau pour plusieurs heures dans le courant, ce filet interceptait environ 10 % de la section du canal. La récupération des anguilles capturées s'effectuait depuis une embarcation dans laquelle l'extrémi-

té aval du filet était remontée. Cette pêche expérimentale a fonctionné de manière satisfaisante pendant les deux campagnes de suivi : elle a permis la capture de 214 anguilles la première année en 140 nuits de pêche (du 1er septembre 2009 au 26 janvier 2010) et 118 anguilles la seconde année en 122 nuits de pêche (du 8 novembre 2010 au 13 mars 2011). Une opération de capture – marquage – recapture menée la première année a permis d'estimer l'efficacité de la pêche à près de 8 %, ce qui est du même ordre de grandeur que le rapport des sections du filet et du canal d'aménée (10 %).

L'analyse des résultats a montré que la période de référence retenue initialement – du 1er septembre au 31 décembre – n'englobait pas les principaux pics de dévalaison : ceux-ci ont eu lieu plus tardivement, en janvier ou en février.



Au final, ce dispositif s'avère pertinent pour le recueil d'informations relatives à l'influence des paramètres de milieu sur la dévalaison, en particulier le débit et la turbidité. Elle constitue donc une source de connaissances intéressante en vue de l'élaboration de « modèles » locaux de prévision des dévalaisons. Ainsi, des premiers modèles prédictifs de présence/absence proposés par l'équipe scientifique à l'issue des premières campagnes ont pu être testés sur les captures réalisées par la pêcherie en 2011.

L'utilisation d'une telle pêcherie apparaît toutefois limitée aux configurations présentant une concentration du débit du cours d'eau dans une section de passage réduite, afin de capter une fraction suffisante du flux dévalant. Si la pêcherie est située au niveau du canal d'amenée d'une usine hydroélectrique, les déversements doivent rester minoritaires de façon à éviter les biais résultant de l'échappement des anguilles par le barrage. Par ailleurs, les très faibles vitesses d'écoulement lors des périodes à faible débit peuvent rendre le filet «

guideau » peu opérant voire inopérant.

D'un coût élevé (environ 50 K€ pour l'installation de la pêcherie), ce dispositif demande également des moyens considérables en fonctionnement : les pêcheurs (équipe de 2 personnes au minimum) sont mobilisés toutes les nuits de 18h à 6h pendant au moins quatre mois.

Dévalaison et modélisation : une approche prometteuse en Loire

Une pêcherie expérimentale comme celle présentée ci-dessus constitue une source précieuse d'informations locales sur les rythmes de dévalaison des anguilles, permettant de les relier à différents paramètres environnementaux. Dans une perspective opérationnelle, de telles données permettent d'envisager le développement de modèles prédictifs, capables d'annoncer les pics de dévalaison de manière fiable et anticipée : un délai de 24 heures apparaît nécessaire pour laisser aux gestionnaires le temps de programmer les arrêts ciblés de turbinage.



Dans le cadre du programme R&D, un modèle de ce type a été développé (Anthony Acou, MNHN) pour le linéaire de la Loire entre Angers et Nantes, seul linéaire français pour lequel sont disponibles des séries à long terme de captures d'anguilles argentées, du fait de la présence ancienne d'une filière de pêche professionnelle organisée. L'action visait à sélectionner, par une analyse bibliographique, les facteurs environnementaux susceptibles de caractériser les fenêtres de migration ; et à construire un modèle prédictif de dévalaison sur la base du nombre d'anguilles capturées par nuit de pêche.

Après examen des carnets de pêche, les données de captures, essentielles au calage des modèles, constituent une série validée de vingt années (1987-2006) de captures journalières réalisées au «guideau» (chalut immobile dans le courant), correspondant à la moyenne de quatre pêcheries. Une modélisation de type Modèle Linéaire Généralisé a été conduite. Deux modèles ont été construits. Le 1^{er} estimant une probabilité de présence/absence, le second, dans le cas d'une présence effective, estimant des abondances de flux dévalant. Le modèle final prédit les captures d'anguilles

au jour j selon une formule (voir encadré).

Conçu pour prévoir les fenêtres de dévalaison à 24 h, il livre des prédictions fiables : en moyenne, 80 % des pics observés sont prédits. En revanche, il montre une tendance à la sur-prédiction (annonce de pics de dévalaison non observés). La figure 17 compare les prévisions et les captures observées pour l'année 1987.

Des simulations d'arrêt de turbine ont été menées dans la zone d'étude. Les résultats du modèle en termes de taux d'échappement ont été comparés à une gestion des arrêts

uniquement basée sur des valeurs seuils de débit. Ils plaident clairement en faveur du modèle «environnemental» : il permettrait par exemple d'assurer un échappement de 45 % des anguilles en 19 nuits d'arrêt, tandis que la méthode hydrologique (arrêt lorsque le débit dépasse une valeur seuil) assure ce même taux d'échappement en 63 nuits d'arrêt. Pour mémoire, il faudrait 120 nuits d'arrêt des turbines pour garantir l'échappement de 100 % du stock d'anguilles sur ce même tronçon.

Cette action de recherche constitue une avancée significative pour offrir aux gestionnaires, dans certaines condi-

tions une gestion plus optimale des arrêts de turbinage au service de la sauvegarde de l'anguille. Le projet se poursuit : une phase essentielle, en cours, vise à extrapoler le modèle et à en tester les prévisions dans d'autres bassins versants – notamment celui de la Dordogne. Les résultats à venir permettront de procéder à des ajustements de l'outil, et d'en généraliser éventuellement l'utilisation. Enfin, une autre étude est en cours sur des cours d'eau de petite taille pour examiner si un nombre plus restreint de paramètres environnementaux (variations

de débit et pluie) permettrait d'anticiper convenablement les rythmes de dévalaison.

Vers une gestion adaptée du turbinage par l'hydrologie : éléments complémentaires

En parallèle à ces travaux de modélisation des flux journaliers d'anguilles sur la base des facteurs environnementaux, des éléments quantitatifs ont été apportés (Ph. Baran, Onema), dans le cadre du programme R&D, pour estimer les durées potentielles d'arrêt de turbinage

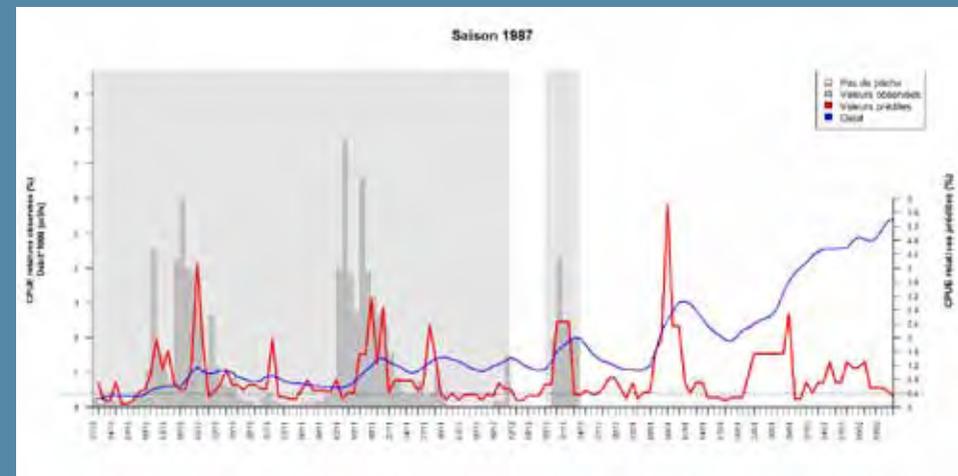
Estimer les flux journaliers d'anguilles argentées

$$CPUE_j = IL_j + \Delta Q_{j-1} + TURB_{j-1} + SEM_j + TEMPS_j$$

Cette formule fait intervenir :

- la variation journalière de débit (ΔQ , en %) ;
- la turbidité (TURB, en NTU = Nephelometric Turbidity Unit), qui quantifie la lumière perçue par l'anguille dans la colonne d'eau ;
- l'indice de luminosité (IL, sans unité ; Cairns & Hooley, 2002) qui quantifie l'éclairage nocturne total à partir des phases lunaires et de la nébulosité. Cet indice varie entre 0 (correspond par exemple à une nouvelle lune avec une nébulosité maximale) et 1 (pleine lune toute la nuit sans nuages). L'IL fournit chaque nuit une estimation beaucoup plus fine de la lumière perçue par les anguilles à la surface de l'eau par rapport à l'utilisation classique des phases lunaires ;
- le type de temps qui décrit l'ambiance atmosphérique (indice TEMPS, Paquet et al., 2006) selon 8 modalités (dépression centrale, anticyclone, retour d'est, etc.) ;
- le numéro de la semaine (SEM) ;

Figure 17. Nombre d'anguilles capturées sur la Loire, par nuit de pêche, pour l'année 1987 : valeurs observées et valeurs prédites par le modèle.

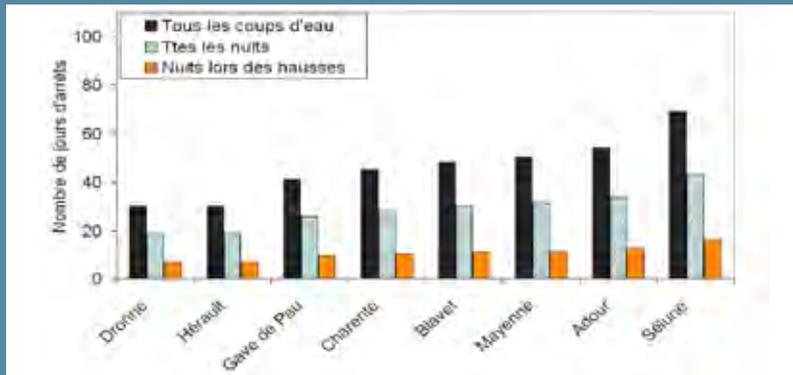


sur la base d'analyses de l'hydrologie des rivières en période de dévalaison. Les suivis réalisés sur le Gave de Pau (voir section 2.1) fournissent une vision assez claire des conditions de débit liées aux fenêtres de dévalaison. Il apparaît ainsi que 83% des franchissements d'ouvrages observés ont lieu lors des «coups d'eau», périodes de variation significative du débit. En outre, 83 % des franchissements ont également lieu de nuit (entre 17h et 8h) ; 50 % des franchissements ont lieu lors des coups d'eau supérieurs à quatre fois le module du cours d'eau. Pour fixer les idées, les hausses de débit survenant de nuit sur le Gave de Pau représentent en moyenne 10 jours par an, et concentrent 59 % des pas-

sages d'anguilles. Ces résultats ne peuvent toutefois être totalement généralisés étant donné le caractère spécifique de l'expérimentation du Gave de Pau.

Pour d'autres cours d'eau, marqués par des régimes hydrologiques différents, les durées d'arrêt correspondant aux mêmes critères peuvent varier sensiblement. L'analyse de chroniques hydrologiques pour huit autres rivières françaises a permis d'estimer, à titre de comparaison, le nombre de jours correspondant aux coups d'eau ; aux coups d'eau survenant de nuit ; et aux hausses de débit survenant de nuit. Ces résultats sont donnés sur la figure 18.

Figure 18. Durée potentielle d'arrêts de turbinage selon différents scénarios de gestion pour huit rivières françaises.



Dans tous les cas, l'une des principales problématiques associées aux arrêts de turbinage reste la capacité à prédire la survenue de ces épisodes hydrologiques et donc à anticiper les arrêts. Pour ce faire, l'approche la plus solide reste le suivi du gradient de débit en amont du bassin. Mais la possibilité d'anticiper les crues par ce biais est conditionnée à la similitude des signaux amont-aval : là encore, les situations divergent d'un cours d'eau à l'autre. L'analyse menée pour cinq bassins français (Blavet, Charente, Dronne, Gave de Pau, Hérault) a montré que cette similitude existait pour quatre d'entre eux – seul le Gave de Pau ne la vérifie pas. Mais cette condition de similitude amont-aval n'apparaît pas encore suffisante. Pour

les quatre rivières citées, l'anticipation des épisodes de hausse apparaît possible sur la partie aval des rivières, mais pas pour leur cours médian. Pour la Charente et la Dronne, 100 % des coups d'eau ont pu être anticipés à 24h à partir d'une référence amont, tandis que seulement 50 % étaient annoncés dans le cas de l'Hérault.

Les équipes scientifiques de l'Onema ont pu identifier quelques critères génériques pour l'identification des rivières compatibles avec cette approche pour l'anticipation des coups d'eau. Il s'agit d'abord de bassins versant suffisamment étendus, présentant des régimes hydrologiques homogènes et dont le rapport de surface de bassin versant entre l'amont et l'aval



est au minimum d'un facteur 15. Cela signifie que lorsque le site « d'alerte » hydrologique est de 100 km² en amont, la prévision des arrêts ne sera réellement possible en aval, avec un décalage suffisant, que pour des sites dont la surface du bassin versant est supérieure à 1 500 km². A contrario, les arrêts de turbinage anticipés sur la base d'alertes hydrologiques apparaissent impossibles pour les bassins à régime hydrologique mixte

ou de nappe. Ils sont également délicats pour les bassins à régime hydrologique méditerranéen. Quant au gradient minimal de débit à prendre en compte pour anticiper une hausse en aval, il est à adapter selon les bassins, afin de trouver le meilleur compromis entre la détection des coups d'eau réels et les hausses non significatives. Pour mémoire ce gradient minimal correspondrait à 13 % du module en 24 heures dans le cas de la

Charente, 15 % pour la Dronne et 20 % pour l'Hérault. Dans ces conditions, 15 à 35 % des hausses annoncées correspondraient encore à de «fausses alertes».

Au final, les arrêts de turbinage sur la base d'alerte hydrologique constituent, en complément des modèles plus complexes intégrant des paramètres environnementaux, une piste intéressante et relativement simple à mettre

en oeuvre sur les bassins auxquels ils sont adaptés, soit une part significative du réseau hydrographique français. Les travaux engagés en ce sens doivent se poursuivre par une analyse hydrologique approfondie des bassins candidats, visant notamment à préciser des gradients d'alerte adaptés. Ces approches pourraient par ailleurs être affinées par l'exploitation des prévisions météorologiques. ■



Des fiches techniques pour l'action



La connaissance de la biologie de l'anguille et de son comportement est un socle essentiel dans la construction et la mise en œuvre de solutions de gestion pour la protection de cette espèce. La complexité des processus de migration notamment nécessite des actions d'étude et de recherche.

Dans le cadre du programme, un effort a porté sur le déterminisme de la dévalaison avec des moyens de suivi importants que ce soit par l'intermédiaire de pêche expérimentale comme sur la Dordogne ou de suivis par télémétrie ou marquage magnétique comme sur le Rhin et le Gave de Pau.

Pour la montaison, c'est au travers des études de solutions techniques pour le franchissement des obstacles que des connaissances complémentaires sur les rythmes de migration ont pu être acquises.

CONNAISSANCE

Mise au point d'un protocole d'échantillonnage pour la dévalaison des rythmes de dévalaison de l'anguille sur la Dordogne

[Fiche 1]

Responsable scientifique :
Laurence Lissalde-Bonnet (EDF-CIH)

Filet en cours de descente © ECOGEA



1. Contexte général de l'action

La solution retenue pour permettre la dévalaison des anguilles au droit de l'aménagement hydroélectrique de Tuilières (Dordogne) consiste en des arrêts nocturnes ciblés de turbinés en association avec l'ouverture de vannes comme exutoire de dévalaison. En l'absence de connaissances sur les rythmes migratoires, cette disposition est appliquée tous les jours du 1^{er} septembre au 31 décembre, dans le but d'encadrer la période prioritaire de dévalaison. De façon à minimiser les arrêts de turbines, une connaissance des rythmes migratoires et des paramètres influents s'imposait. A cet effet, il a été procédé à la mise en place d'une pêcherie d'échantillonnage expérimentale à une vingtaine de kilomètres en amont de Tuilières et à l'installation de stations de mesure des paramètres environnementaux.

2. Objectifs de l'action

L'objectif de cette expérimentation est de déterminer la faisabilité d'une pêcherie d'échantillonnage et d'acquérir par cet échantillonnage des connaissances sur les flux migratoires d'anguilles sur la Dordogne ainsi que sur l'influence de paramètres environnementaux tels que le débit, la température, la conductivité, la turbidité de l'eau, les phases de la lune...

3. Sites d'étude – Méthodologies

La pêcherie expérimentale est située dans le canal d'amenée de l'usine hydroélectrique de Mauzac. Elle fonctionne sur le principe du filet « guideau » utilisé par la pêcherie commerciale d'anguille d'avalaison de la Loire. Le filet est manœuvré à partir d'une plate-forme installée dans le canal d'amenée. Cette plate-forme de pêche est constituée de blocs en plastique, sur lesquels sont installés divers engins de levage, amarrage et tractage. Le filet « guideau », fixé à la plate-forme, est mis à l'eau pour plusieurs heures dans le courant, de façon à intercepter les anguilles dévalantes. Le filet de 6 mètres de large et



Vue aérienne de l'aménagement de Mauzac © EDF

3 mètres de haut (18 m²) couvre environ 10 % de la section du canal (175 m²) : 35 m de large et 5 mètres de profondeur. La récupération des anguilles dans le filet s'effectue à partir d'une embarcation dans laquelle l'extrémité aval du filet est remontée. La conception et l'exploitation de l'installation ont été réalisées par des pêcheurs professionnels dont l'expérience et le savoir-faire sont indispensables.



Vue du canal depuis l'amont © ECOGEA

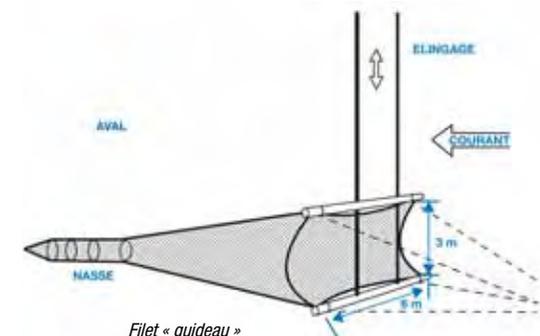
4. Résultats

La pêcherie expérimentale a fonctionné sans problème particulier durant les deux campagnes de suivi. Elle a permis la capture de 214 anguilles la première année en 140 nuits de pêche (du 1^{er} septembre 2009 au 26 janvier 2010) et 118 anguilles la seconde année en 122 nuits de pêche (du 8 novembre 2010 au 13 mars 2011).

L'expérimentation de Capture – Marquage – Recapture (CMR) menée la première année a permis d'estimer l'efficacité de la pêcherie à près de 8%, ce qui est du même ordre de grandeur que le rapport des sections du filet et du canal d'amenée (10%). Le positionnement de la plate-forme dans le canal d'amenée s'est avéré être une composante importante de son efficacité. Elle a pu être optimisée grâce à une opération de radiopistage qui a mis en évidence les trajectoires préférentielles des anguilles dans le canal.

L'analyse des premiers résultats (suivi 2009-2010 et 2010-2011) semble montrer que la période de référence 1^{er} septembre – 31 décembre retenue initialement n'englobe pas les principaux pics de dévalaison qui ont lieu plus tardivement dans la saison (janvier-février).

La pêcherie a permis de recueillir des informations relatives à l'influence des paramètres de milieu sur le déterminisme de la dévalaison (débit et turbidité essentiellement) et d'élaborer des « modèles » préliminaires de prévision des dévalaisons. Dans le cadre de la mise en œuvre opérationnelle de ces modèles de prévision en 2011, les captures réalisées par la pêcherie permettent de vérifier l'exactitude des modèles (en présence/absence).



5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Connaissance des rythmes de dévalaison des anguilles argentées.

Transfert technologique : Dans son principe, la technique d'échantillonnage par filet « guideau » s'avère adaptée à la collecte d'informations sur les rythmes de dévalaison des anguilles argentées sur des cours d'eau de la taille de la Dordogne (module de 280 m³/s). L'implantation dans un canal d'amenée d'usine hydroélectrique est favorable du fait que la section de passage y est réduite et que les vitesses d'écoulement y sont en général compatibles avec l'exploitation du filet « guideau » durant la majorité du temps.

La mise en place d'une pêcherie expérimentale de ce type nécessite d'avoir une section de passage réduite afin de capter au maximum le flux dévalant. Si la pêcherie est située au niveau du canal d'amenée d'une usine hydroélectrique, les déversements doivent rester minoritaires de façon à éviter les biais résultant de l'échappement des anguilles par le barrage. Par ailleurs, les très faibles vitesses d'écoulement lors des périodes à faible débit peuvent rendre le filet « guideau » peu opérant voire inopérant.

Le coût de mise en œuvre d'une pêcherie expérimentale de ce type est élevé (environ 50 K€ pour l'installation de la pêcherie) et demande des moyens humains considérables puisque les pêcheurs (équipe de 2 personnes au minimum) sont mobilisés toutes les nuits de 18h à 6h pendant au moins quatre mois.

Partenaires : ECOGEA, Association Agréée Interdépartementale des Pêcheurs Professionnels du Bassin de la Garonne (AAIPBG)

Contacts : Thierry Lagarrigue, lagarrigue.ecogea@wanadoo.fr ;
Laurence Lissalde-Bonnet, laurence.lissalde-bonnet@edf.fr

Mode de franchissement d'obstacles en série sur le Rhin

Responsable scientifique :
Eric de Oliveira (EDF R&D – LNHE)

Station Nedap alimentée par panneaux solaires. Les trois câbles d'antenne sont visibles sur la berge (© E. De Oliveira)



1. Contexte général de l'action

Lors de la dévalaison sur un axe fluvial, les anguilles peuvent franchir les ouvrages hydroélectriques soit par les centrales (turbines), où elles subissent des mortalités pouvant être significatives selon le type de turbine, soit par les ouvrages d'évacuation des crues où le passage se fait sans dommage. Cette répartition des voies de franchissement est conditionnée par la configuration des sites et par l'hydrologie du cours d'eau. La détermination des voies de passage est fondamentale pour estimer les dommages potentiels induits par les aménagements hydroélectriques sur un axe.

2. Objectifs de l'action

Cette expérimentation a pour but de fournir des éléments quant aux modalités de dévalaison des anguilles argentées induites par les ouvrages hydroélectriques sur un grand fleuve comme le Rhin : dynamique de dévalaison en fonction des paramètres environnementaux du fleuve, répartition des différentes voies de franchissement des aménagements hydroélectriques et évaluation des vitesses de dévalaison sur l'axe en fonction de l'hydrologie du cours d'eau. De plus, la configuration du Rhin doit permettre d'analyser la dynamique de la dévalaison sur une partie de cours d'eau, longue de 53 km (Le Vieux Rhin), exempte d'aménagement hydroélectrique.

3. Sites d'étude – Méthodologies

L'étude des rythmes de migration est suivie à l'aide de la technique NEDAP TRAIL® basée sur le principe de la radio-identification (*Radio Frequency Identification*). Cette technique a été choisie suite à une étude de faisabilité menée sur le Rhin. La technologie Nedap consiste à équiper des anguilles de transpondeurs (implants internes), à les relâcher à l'amont de la zone de suivi et à détecter leur passage grâce à des stations fixes de détection judicieusement réparties. Ces stations sont équipées de câbles d'antennes posés transversalement à l'écoulement, au fond du cours d'eau.

La détermination exhaustive des voies de franchissement des 10 aménagements de la partie française du Rhin (barrage, usine et écluses de navigation) nécessiterait l'installation de 29 à 30 stations de détection. Compte tenu du coût important de ces stations ainsi que des incertitudes concernant la mise en œuvre de l'étude et l'interprétation des résultats, 9 stations ont été achetées et 6 stations ont été installées depuis 2009. Cette configuration à 6 antennes permet de :

- connaître de façon exhaustive, la répartition des différentes voies de passage pour le site de Kembs (usine, écluse, barrage) ;
- comptabiliser le nombre d'individus franchissant le Grand Canal d'Alsace (GCA) équipé de 4 usines hydroélectriques ;
- comptabiliser le nombre d'individus empruntant le Vieux Rhin vierge de tous obstacles (en parallèle du Grand Canal d'Alsace) ;
- analyser la cinétique de migration sur les deux voies, GCA et Vieux Rhin, en fonction des paramètres de milieu (débit, température, turbidité, ...).

Il est prévu d'équiper le site de l'Ifezheim (le plus à l'aval) pendant l'année 2012. De plus, il est possible d'utiliser les stations déjà installées en Allemagne et Hollande afin de suivre les poissons jusqu'à l'estuaire. En parallèle, des stations de mesures dédiées à la turbidité, la conductivité, la température et l'intensité lumineuse ont été installées le long du Rhin par EDF, et les débits turbinés et déversés (barrages) sont connus.

4. Résultats

Au cours des deux premières saisons (2009-2010 et 2010-2011), de nombreux problèmes ont été rencontrés lors de la mise en place des dispositifs : arrachage des câbles d'antenne (ancrage péniche), incompatibilité de composants électroniques, problèmes de batteries des émetteurs... Ces difficultés ont été résolues en grande partie et les dispositifs peuvent être considérés comme opérationnels. Le relevé de juillet 2011 a montré que l'antenne ayant connu le plus de problème a fonctionné 23 % du temps depuis son installation, contre 96 % du temps pour celle qui a fonctionné le plus longtemps.

Le problème majeur rencontré au cours de cette saison a été le dysfonctionnement de 115 transpondeurs sur 142 utilisés, du fait de leur auto-activation et déchargement pendant leur stockage. Un protocole de test avant implantation a été élaboré et validé avec la société Nedap.

Au vu du faible nombre de poissons suivis à ce jour, il est encore difficile de conclure sur les répartitions du flux migratoire en fonction des paramètres environnementaux. Cependant, quelques résultats ont pu être obtenus. Au total sur les 27 poissons marqués, 20 poissons ont débuté leur migration. Au niveau du site de Kembs, 75% des anguilles ont dévalé via l'usine hydroélectrique (GCA) et un quart a dévalé via le barrage (Vieux Rhin). Il est à noter que 50% des anguilles en migration active sont parvenues à l'aval de l'usine de Vogelgrun et ont donc dévalé la totalité du Vieux Rhin ou bien ont franchi les 4 usines du GCA. Un unique individu a franchi l'antenne la plus à l'aval, 1 jour et demi après son lâcher (plus de 90 km). Pour franchir le GCA (50 km), les temps de dévalaison s'étalent entre 13 heures et un peu moins de 3 mois.

Ces résultats sont provisoires, l'expérimentation nécessite un plus grand nombre d'individus suivis et des résultats pluriannuels pour avoir des conditions de dévalaison différentes. L'objectif pour la saison 2011-2012 est de pouvoir marquer un nombre beaucoup plus conséquent d'anguilles et des les relâcher en amont du site de Kembs et dans le Vieux Rhin.



Implantation des stations Nedap (numérotées de 1 à 7) et des stations de mesures environnementales (points rouges)

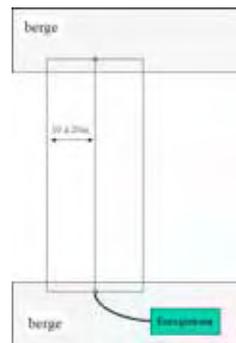


Schéma d'implantation d'une station Nedap

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Connaissance des rythmes de dévalaison des anguilles argentées.

Transfert technologique : Pour les grands cours d'eau comme le Rhin, la technologie Nedap s'avère bien adaptée à la mesure de la répartition du flux d'anguilles migrant transitant soit par les ouvrages évacuateurs, soit par les turbines, soit par les écluses. La prise en main de cette technologie, que ce soit au niveau de l'installation des stations ou des caractéristiques des transpondeurs, nécessite cependant une certaine expérience.

Du fait de l'impossibilité de suivre les individus manuellement entre les stations de détection, cette technique nécessite d'en marquer un nombre important pour produire des résultats exploitables (non prise en compte des arrêts de migration, de la prédation, ...). Seule, la technique NEDAP ne permet pas de quantifier la mortalité des anguilles franchissant les turbines, mais uniquement de connaître la part d'individus empruntant les voies de passage équipées d'antenne. Pour ces différentes raisons, un nombre élevé d'individus doit être suivi et ce, pendant plusieurs années. Une autre limite de la technologie concerne le coût élevé des stations et de leur installation qui est de l'ordre de 200 K€ par station.

Perspectives : Cette action couplée à la connaissance de la mortalité engendrée par le passage par les turbines des ouvrages (formules prédictives et mesures *in situ*) devrait permettre d'estimer le flux d'anguilles migratoire parvenant à franchir les ouvrages du Rhin français et de fournir des éléments quant aux conditions environnementales favorisant la migration des anguilles argentées. Pour cela, il est prévu au cours des 4 à 5 prochaines années d'équiper et de relâcher plus de 300 anguilles par an.

Partenaires : Onema, Association Saumon Rhin, Agence de l'Eau Rhin-Meuse (co-financeur de l'action), Petite Camargue Alsacienne, NEDAP

Pour en savoir plus : <http://www.nedaptrail.com/>

Contact : Eric De Oliveira (eric.de-oliveira@edf.fr), Sébastien Manné (sebastien.manne@Onema.fr)

Migration de dévalaison et franchissement d'aménagements hydroélectriques : l'étude du Gave de Pau

[Fiche 3]

Responsables scientifiques :

Michel Larinier (Onema), Frédérique Bau (Irstea),
Philippe Baran (Onema), François Travade (EDF).

Centrale hydroélectrique - vue amont - © P. Gomes



1. Contexte général de l'action

Les ouvrages hydroélectriques peuvent causer des dommages aux anguilles lors de leur dévalaison notamment lors du passage dans les turbines. La quantification de ces dommages repose sur la connaissance de l'activité migratoire, de la répartition des poissons entre les différentes voies de passage au droit des ouvrages et de la mortalité subie lors du passage au travers des turbines. La présente étude répond à l'action du programme R&D Anguille & Ouvrages, qui consiste à déterminer les modalités de franchissement par l'anguille argentée d'obstacles hydroélectriques en série sur un axe de cours d'eau donné. Elle s'inscrit dans la continuité de travaux initiés en 2004 sur le Gave de Pau, portant sur le suivi par radiotélémetrie du comportement fin de l'espèce essentiellement au droit d'un ouvrage hydroélectrique (usine de Baigts) (Travade *et al.*, 2009, 2010).

2. Objectifs de l'action

L'action du programme visait à :

- déterminer les relations entre l'activité migratoire d'anguilles argentées sur un axe et les paramètres de l'environnement, notamment l'hydrologie ;
- connaître le comportement des poissons en amont des barrages hydroélectriques et à identifier les voies de passages empruntées (turbines hydroélectriques, évacuateurs de crues, exutoires, passes à poissons) ;
- établir des modèles susceptibles de prédire les voies de passage en fonction des caractéristiques des ouvrages et des paramètres environnementaux.

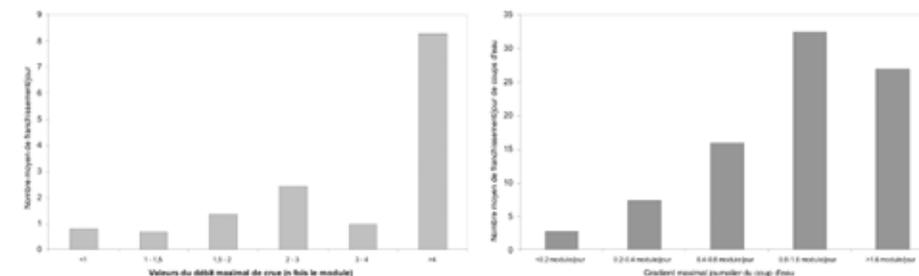
3. Sites d'étude – Méthodologies

L'étude a été conduite de 2007 à 2010 sur un tronçon de 60 km du Gave de Pau entre Jurançon et Puyoo (module 82 m³/s) comprenant 6 ouvrages hydroélectriques (débit turbiné variant de 20 à 110 m³/s). Au total, 192 anguilles argentées ont été suivies par radiotélémetrie sur une période de 4 à 5 mois (novembre-avril) par an. L'installation de jeux d'antennes réceptrices au droit de chaque centrale a permis d'identifier avec précision les périodes de franchissement des ouvrages par les anguilles et surtout leur voie de passage. Le comportement des anguilles a pu être relié aux variations de certaines paramètres environnementaux (hydrologie, conductivité, température, turbidité) ainsi qu'au fonctionnement des installations hydroélectriques. Une approche statistique par Modèle Linéaire Généralisé (GLM) a permis de proposer des outils de prédictions des voies de franchissement (turbines, évacuateurs) d'un ouvrage hydroélectrique par des anguilles argentées.

4. Résultats

Activité migratoire des anguilles

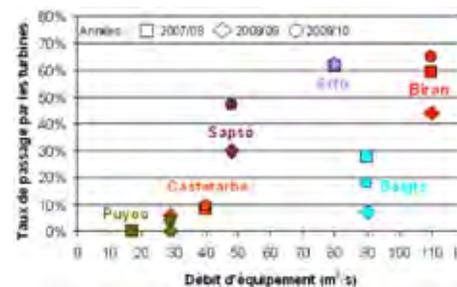
L'activité migratoire des anguilles a été assimilée au nombre de franchissements d'ouvrage comptabilisé par jour de suivi. 562 franchissements d'ouvrage ont été réalisés par les anguilles marquées. Les anguilles franchissent les aménagements hydroélectriques sur une large gamme de débit variant de 25 m³/s (étiage) à plus de 529 m³/s. La moitié des passages a lieu à des débits supérieurs à 2 fois le module et 90 % sont effectués durant des variations de débits qui représentent 37 % du temps avec une majorité de passages (83 %) durant les montées d'eau. L'activité migratoire des anguilles s'avère fortement liée au gradient journalier de débit ainsi qu'à la valeur maximale atteinte lors des « coups » d'eau et se caractérise par des alternances de périodes d'activité migratoire (dévalaison) et de périodes de repos où les anguilles peuvent rester plusieurs jours parfaitement immobiles. Les franchissements sont essentiellement nocturnes. 83 % des franchissements ont eu lieu entre 17h00 et 8h00. La vitesse de dévalaison lors des épisode migratoire est en moyenne de 3 km/h avec une forte variation selon les individus et les tronçons de rivière (de 0.4 km/h à 6 km/h). Elle dépend également beaucoup de l'hydrologie.



Activité migratoire des anguilles en dévalaison en fonction de la valeur maximale du débit de crue et du gradient journalier.

Voies de passage des anguilles au droit des centrales hydroélectriques

Globalement, sur les 6 ouvrages, 65 % des franchissements ont été effectués par les évacuateurs de crue contre 32 % par les turbines et 3 % par les autres voies (exutoires, passes à poissons). Ces valeurs varient beaucoup en fonction des installations hydroélectriques (de 2 % à 62 % de passages par les turbines) ceci en raison essentiellement du débit d'équipement de la centrale, de l'espacement inter-barreaux des grilles de prise d'eau (pour les usines dont les grilles sont plus fines), des modalités de gestion lors des crues de la configuration de la prise d'eau et du déversoir et du positionnement sur l'axe en fonction des points de déversement des anguilles.



Nombre d'anguilles franchissant l'ouvrage par les turbines en fonction du débit d'équipement de la centrale.

Les voies de passages au droit des centrales sont fortement influencées par la répartition des débits entre la prise d'eau (turbines) et les évacuateurs de crue (débits déversés) lors de l'arrivée des anguilles sur le site.

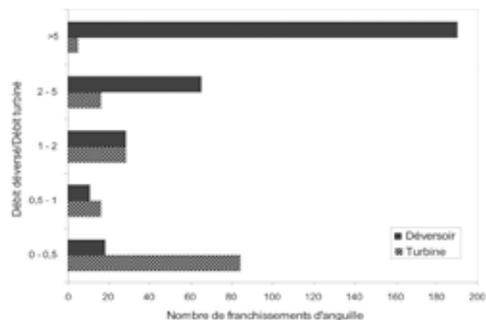
Plus les débits déversés au barrage deviennent importants et plus la proportion d'anguilles franchissant l'ouvrage par cette voie (échappement aux turbines) augmente. Les exutoires de surface utilisés pour la dévalaison des salmonidés se sont avérés d'une moindre efficacité pour l'anguille que pour les smolts mais peuvent être un complément non négligeable à l'échappement des anguilles (jusqu'à 20 % à Baigts), notamment sur les sites où les grilles de prise d'eau exercent un certain effet répulsif sur les individus (espacement des barreaux inférieur à 3 cm).

L'analyse statistique des données obtenues sur les six ouvrages a permis de produire des modèles d'estimation de la probabilité de passage par les turbines pour les anguilles argentées en dévalaison en fonction des conditions hydrologiques et plus particulièrement de ratio entre le débit déversé au barrage et le débit total de la rivière. Plus ce ratio augmente et plus la probabilité de non passage par les turbines est élevée. Les modèles sont différents selon les ouvrages en fonction à la fois de la présence d'une grille à faible espacement inter-barreaux (Baigts) et de la configuration du barrage (Sapso). Pour un même ratio de débit (0.5), le passage des anguilles par les évacuateurs peut varier 33 % à 76 % selon l'usine.

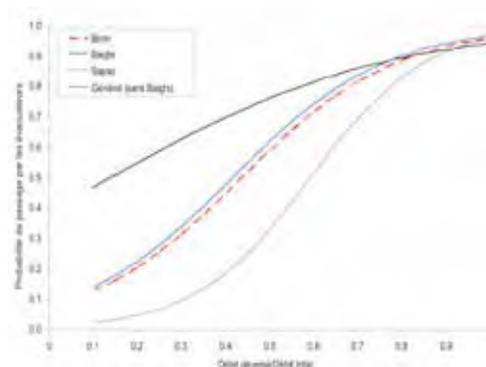
5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Diagnostic de l'impact des usines hydroélectrique sur la dévalaison des anguilles argentées.

Transfert technologique : L'action a permis de mieux appréhender le comportement des anguilles en amont des ouvrages hydroélectriques lors de leur dévalaison. Elle a mis en évidence l'échappement par les évacuateurs de crue et propose des outils d'estimation de cet échappement en fonction des conditions hydrologiques et des rapports de débits au droit des prises d'eau. Elle confirme également les spécificités de chaque ouvrage



Nombre de franchissements d'anguilles par le déversoir ou les turbines en fonction de la répartition des débits entre l'usine et le barrage.



Modélisation de la probabilité de passage par les évacuateurs en fonction du ratio entre le débit déversé au barrage et le débit total de la rivière.

et notamment l'importance de l'espacement inter-barreaux des grilles de prise d'eau ainsi que de la configuration générale du déversoir. Les résultats permettent de proposer des bases pour la construction d'un outil de diagnostic des incidences des ouvrages hydroélectriques à l'échelle d'un axe de cours d'eau. Les exutoires de dévalaison existants pour les smolts peuvent être, sur certains sites, un complément non négligeable à l'échappement aux turbines, ce qui conduit à recommander leur mise en service pendant la période de migration de l'anguille.

Partenaires : Topwatt, Société Hydroélectrique et Immobilière du Sud, SUO Energie, Migradour

Pour en savoir plus :

F. BAU, P. GOMES, N. BORDES, M. LARINIER, F. TRAVADE, E. DE OLIVEIRA, 2008. Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le Gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2008). Rapport GHAAPPE/EDF – RA08.06, N°H-P76-2008-04291-FR, 88p et annexes.

F. TRAVADE, M. LARINIER, S. SUBRA, P. GOMES, E. DE-OLIVEIRA, 2009. Franchissement par l'anguille argentée en dévalaison de l'aménagement hydroélectrique de Baigts-de-Béarn (64). Influence des débits et de la taille des anguilles sur le comportement de dévalaison et fonctionnalité des exutoires. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 57p et annexes.

F. BAU, P. GOMES, P. BARAN, M. LARINIER, F. TRAVADE, E. DE OLIVEIRA, A. FREY, JM. MENNESSIER, 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, 103p et annexes.

F. TRAVADE, M. LARINIER, P. GOMES, J., S. SUBRA, E. DE OLIVEIRA, 2010. Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst., 398.

F. BAU, P. GOMES, J. LAFITTE, P. BARAN, M. LARINIER, F. TRAVADE, E. DE OLIVEIRA, 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, 99p et annexes.

F. BAU, P. GOMES, P. BARAN, H. DROUINEAU, M. LARINIER, F. TRAVADE, E. DE OLIVEIRA, 2012. Migration de dévalaison et franchissement d'aménagements hydroélectriques en série : synthèse des 3 années d'étude sur le Gave de Pau. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

Contacts : François Travade (François.travade@edf.fr), Philippe Baran (philippe.baran@imft.fr ou philippe.baran@onema.fr)

5

Des outils de diagnostic indispensables à la

mise en œuvre des solutions de gestion



A toutes les échelles de gestion et d'intervention depuis le territoire national jusqu'à chaque ouvrage en passant par les Unité de Gestion ou les bassins, il est indispensable de conduire des diagnostics permettant d'évaluer de manière concertée et partagée entre les acteurs les impacts des différentes activités humaines.

Dans le domaine des obstacles, un gros effort devait être entrepris sur l'efficacité des dispositifs dédiés à la montaison mais également sur la quantification des incidences des ouvrages hydroélectriques sur la dévalaison.

Le programme s'est concentré sur l'établissement d'outils d'estimation des dommages dans les turbines complété par des méthodes de calcul de la répartition des anguilles dévalantes au niveau des prises d'eau. Ce travail permet de disposer aujourd'hui d'un ensemble d'outils pour des approches cumulées à l'échelle des bassins.

OUTIL DE DIAGNOSTIC

Marquage-recapture et évaluation de l'efficacité d'un dispositif spécifique de franchissement

Fiche 4

Responsables scientifiques :

Christian Rigaud (Cemagref), Hilaire Drouineau (Cemagref), Philippe Baran (Onema).



Seuil du Pas du Bouc - © C. Rigaud

1. Contexte général de l'action

Le suivi d'un dispositif de franchissement montre toujours une migration des anguilles au cours d'une fenêtre de temps assez restreinte (2-3 mois), pour une gamme de tailles assez resserrée avec des pics de passage. Mais il reste toujours une incertitude quant au lien existant entre ces observations et la réalité du flux d'anguilles migrantes se présentant en aval de l'ouvrage. Le principe du marquage-recapture sur un site équipé consiste à injecter un effectif connu d'anguilles marquées à différents endroits en aval d'un ouvrage, puis à observer et à analyser le niveau et la cinétique de leur réapparition dans la passe. Cette stratégie repose sur un faible impact comportemental du marquage, le type de marques variant selon le gabarit des individus testés.

Depuis 1999, Migado (Lauronce *et al.*, 2011) a marqué par pit-tag (marque avec code d'identification électronique), 10 300 anguilles de 25-35 cm sur les sites EDF de Golfech et de Tuillières avec un lâcher à 2-3 km en aval. Les recaptures sont très étalées dans le temps (jusqu'à 7 ans de décalage) et la probabilité annuelle de recapture varie selon les sites et les années (0.08 (± 0.08) sur Golfech (maxi à 0.29) et 0.03 (± 0.04) sur Tuillières (maxi 0.15)). Ces résultats traduisent plus un comportement de déplacement /prospéction au gré des conditions qu'une migration impérieuse.

Au barrage d'Arzal, Briand (*et al.*, 2005) a réalisé des marquages de civelles par colorant vital (*tenue sur 15 jours*). Les recaptures s'échelonnent sur une semaine après le lâcher. L'efficacité journalière du dispositif est estimée à 4% du stock actif et l'efficacité globale de la passe à 30 % du stock actif arrivé après la clôture de la pêche. L'ajout d'une seconde passe en rive opposée n'a contribué qu'à hauteur de 14 % des passages comptabilisés (Anonyme, 2008).



Marquage VIE tous calibres - © Irstea



Marquage par colorant vital de civelles - © Irstea

2. Objectifs de l'action

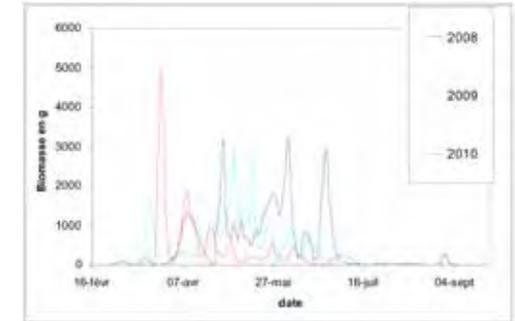
Un marquage par VIE (marque en élastomère de couleur) ayant fait l'objet de tests préalables quant à son faible impact comportemental (Imbert *et al.*, 2005), a été mis en œuvre sur des individus de moins de 15 cm observés sur trois ouvrages équipés de rampes spécifiques, soumis à marée ou très proches de la limite de marée, l'objectif étant d'évaluer l'accessibilité et la transparence de ces ouvrages équipés.

3. Sites d'étude – Méthodologie

Deux ouvrages sont soumis à marée (Riberou sur la Seudre, Enfreneaux sur la Sèvre niortaise), le troisième étant situé à peu de distance en amont de la limite de marée (4 km, Pas du Bouc sur le Canal du Porge).

Sur ces ouvrages, un suivi très régulier (relevé quotidien ou tous les deux jours) est mis en œuvre par les opérateurs locaux (Fédérations 17 et 33, Parc du Marais poitevin) sur toute la période de fonctionnement des rampes.

L'analyse des passages confirme l'existence d'une fenêtre de migration et de pics de passage et met bien en évidence l'influence de certains facteurs environnementaux comme la température, le débit fluvial et les coefficients de marée sur le déclenchement de la saison de migration et sur sa cinétique ultérieure.



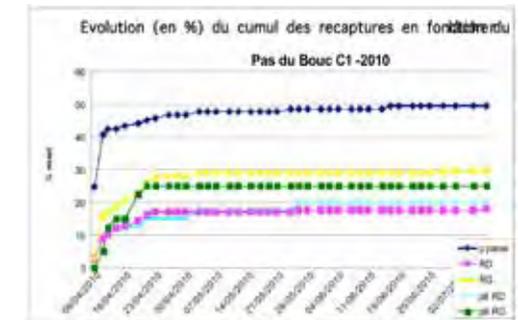
Exemple de Cinétique de passage observée de 2008 à 2010 sur le Pas du Bouc (Fédération de Pêche Gironde)

Lors de chaque campagne, 600 individus issus du piège sont examinés (taille, poids, état sanitaire), puis marqués selon trois lots, l'un remis en pied de passe, les deux autres à une cinquantaine de mètres en aval, en rive droite et en rive gauche. Un lot de contrôle (marqués et non marqués) est maintenu en observation pendant six jours (mortalité toujours inférieure à 1% pour les marqués). Suite au lâcher, tous les relevés des rampes-piège intègrent le repérage à la lampe UV des individus porteurs d'une marque fluorescente (temps de relevé plus long de 50 % par rapport aux relevés classiques). Ces individus étaient mesurés et examinés avant remise à l'eau très en amont de l'ouvrage.

4. Résultats

Sur tous les sites, la chronologie de réapparition des divers lots est assez similaire (décalage entre pied de passe et lots aval, essentiel des recaptures sur 10 jours). Une plus ou moins grande différence de recapture cumulée est observée selon les sites et les essais.

Dans l'exemple ci-contre (Pas du Bouc, Avril 2010), les lots aval en rives droite et gauche ont été doublés (marqués issus soit du piège, soit d'une pêche électrique au pied du barrage) sans que cela ne remette en cause les ordres de grandeur observés dans les recaptures de ces deux zones de lâcher.

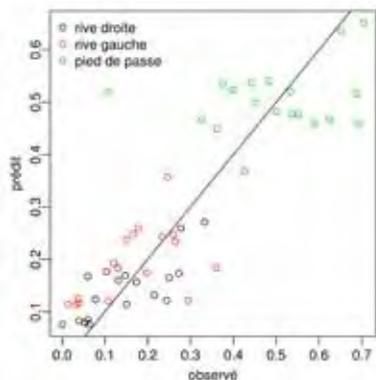


Evolution cumulée des recaptures de civelles marquées après un lâcher en différents points aval de la passe du Pas du Bouc.

p passe : pied de passe
RD : Rive Droite
RG : Rive Gauche
pè RD : origine pêche électrique - relâchées Rive Droite
pè RG : origine pêche électrique - relâchées Rive Gauche

L'examen, sur les trois sites, des niveaux de recapture des lots aval et leur mise en perspective par rapport aux lots mis en pied de passe révèle une forte variabilité inter et intra-site. Derrière cette variabilité se profilent des contextes de fonctionnement différents (estuaire, rivière), des niveaux de remise en activité migratoire non homogènes selon les campagnes et des niveaux d'accessibilité aux rampes variant entre sites, mais aussi entre campagnes sur un site.

Site	Nombre de campagnes	% recapture des lots aval	Ratio des taux de recapture « Aval / Pied de passe »
Pas du Bouc (rivière)	9	22 % (± 10) / Maxi 45 %	0.48 (± 0.24) / Maxi 0.89
Enfreneaux (estuaire)	3	24 % (± 6) / Maxi 31 %	0.72 (± 0.18) / Maxi 0.86
Ribérou (estuaire)	5	41 % (± 17) / Maxi 67 %	0.90 (± 0.28) / Maxi 0.94



Modélisation des probabilités de recapture de civelles marquées et relâchées en aval d'une passe en fonction de différents critères environnementaux et individuels (taille et état des individus, lieu de lâcher, hauteur d'eau, température, nébulosité, jour lunaire,...).

Il apparaît ainsi que, lors d'une opération de marquage, la totalité des individus relâchés en pied de passe n'opte pas pour une reprise de migration, tout au moins immédiate. Ce niveau de remise en activité varie selon les campagnes, mais en étant a priori comparable entre les lots. Enfin, la comparaison Pied de Passe et Aval doit nous renseigner sur le niveau d'accessibilité de la rampe, ce dernier pouvant ne pas être constant selon les périodes.

Pour préciser l'importance relative des différents facteurs (taille et état des individus, lieu de lâcher, hauteur d'eau, température, nébulosité, jour lunaire,...), une analyse Bayésienne a été mise en œuvre sur un premier site (Pas du Bouc, rivière).

Le modèle est basé sur un découpage du parcours d'un individu entre sa remise à l'eau et sa réapparition éventuelle dans le piège plusieurs jours après son lâcher (être vivant et en activité migratoire, trouver le pied de rampe, franchir la rampe) avec une probabilité testée pour chaque phase.

Avec une procédure « Step DIC » qui permet de ne conserver que les paramètres majeurs, le modèle identifie très clairement un débit soutenu transitant par le barrage et une forte hauteur d'eau en pied d'ouvrage comme le paramètre clé déterminant la probabilité d'atteindre le pied de passe pour les lots aval avec une rive gauche toujours légèrement plus favorable.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Evaluation de la transparence d'un ouvrage

Transfert technologique :

- Apport local d'informations pour intégrer la migration de l'anguille dans la gestion hydraulique de l'ouvrage
- Faisabilité de la stratégie de marquage testée, mais avec des contraintes (opérations longues de marquage et de repérage ultérieur lors de relevés de piège) qui amènent à la réserver à quelques sites tests. Importance de la cage de contrôle sur une semaine (mortalité directe éventuelle) et d'un lot déversé en proximité immédiate de la rampe. Prise en compte incontournable du niveau d'activité migratoire des individus dans l'analyse des résultats de telles opérations de marquage-recapture

Perspectives : Ce modèle sera adapté et testé sur les deux contextes estuariens (Ribérou et Enfreneaux) et pourrait être utilisé dans le cadre d'opérations du même type.

Partenaires : Fédération pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques de Charente-Maritime et Gironde, Cellule Migrateurs Charente-Seudre, Parc Interrégional du Marais poitevin

Pour en savoir plus :

RIGAUD C., BARAN P., DROUINEAU H., ROQUEPLO C., LAMARQUE E., FABRE R., ALRIC A., LAHARANNE A., ROUET M., Der MIKALIAN S., 2012. Marquage-recapture et évaluation de l'efficacité d'un dispositif de franchissement sur un ouvrage estuarien ou proche de la limite de marée. Rapport Pôle Eco-hydraulique – Programme R&D Anguilles/Ouvrages.

Contacts : Philippe Baran (philippe.baran@imft.fr ou philippe.baran@onema.fr),
Christian Rigaud (christian.rigaud@irstea.fr)

Mise au point et test d'un compteur automatique à résistivité pour anguillettes

[Fiche 5]

Responsable scientifique :
François Travade (EDF R&D)

Compteur Résistivité - © L. Carry



1. Contexte général de l'action

Le comptage des poissons empruntant les passes est important tant pour évaluer l'efficacité de l'ouvrage de franchissement que pour recueillir des informations biologiques sur le stock migrant. Dans les passes à anguilles spécifiques du type « passes de reptation alimentées par pompage », le comptage peut s'effectuer aisément par piégeage, mais reste cependant très lourd en main d'œuvre et ne permet pas d'obtenir d'informations très précises sur les rythmes de passages. De ce fait, en 1997, un compteur automatique « à résistivité » a été développé par la Société ELFES (devenue ELTA par la suite) à la demande de EDF R&D et du Conseil supérieur de la pêche devenu Onema. Le principe du compteur repose sur le fait que le poisson a une conductivité différente de celle de l'eau. Le comptage des poissons et leur calibration s'effectuent par analyse des variations de conductivité entre des électrodes immergées situées sur le trajet des poissons. Ce compteur a fait l'objet de tests *in situ* et d'évolutions progressives pour aboutir à une version définitive en 2007.

2. Objectifs de l'action

L'objectif de l'action était de valider *in situ* la version définitive du compteur à résistivité.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Le compteur ELFES-ELTA se compose d'un capteur comprenant quatre tubes munis d'électrodes implantés sur un bac de réception et d'un boîtier électronique (voir photos) assurant l'analyse de la conductivité dans chacun des tubes, le comptage et l'évaluation des tailles des anguilles ainsi que le stockage des informations. Le compteur enregistre, pour chaque anguille détectée, l'heure de passage et la valeur du signal de conductivité permettant sa calibration ultérieure en taille et poids à l'aide d'une courbe d'étalonnage (à réaliser pour chaque site). Le bac de réception, sur lequel est implanté le capteur, est installé au niveau de l'exutoire amont des passes « de reptation » alimentées par pompage : les anguillettes tombent dans le bac de réception et passent ensuite dans l'un des quatre tubes. Les tubes sont alimentés en eau par un débit constant (0.1l/mn/tube).

Le compteur a été installé sur la passe à brosses de l'usine hydroélectrique EDF de Golfech (Garonne) en amont d'un piège qui a permis de valider l'efficacité du comptage et de la calibration des anguillettes. Les tests ont été réalisés durant les trois saisons de migration (de mai à juillet) de 2008 à 2010.



Compteur électronique ELFES-ELTA : capteur installé à l'amont de la passe à anguillettes de Golfech.
© L. Carry MIGADO

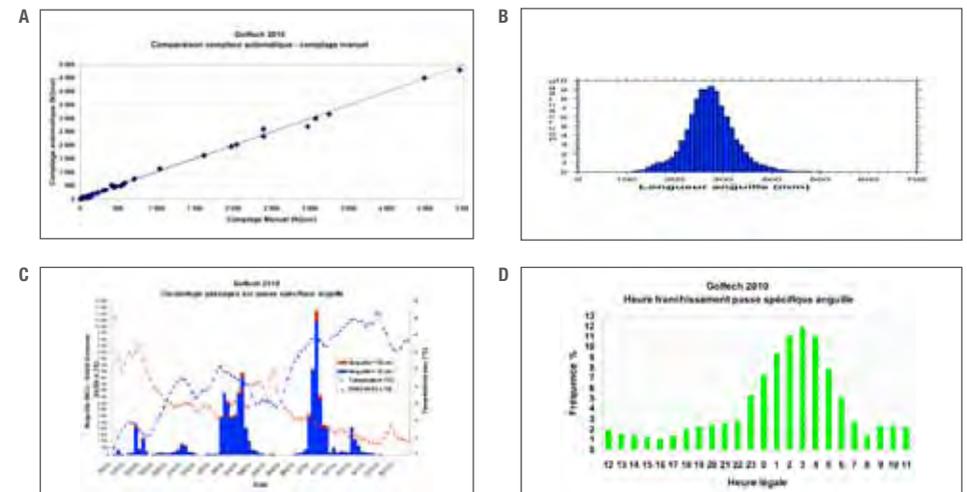


Compteur électronique ELFES-ELTA : boîtier électronique.
© F. Travade EDF

4. Résultats

Les tests réalisés ont permis de valider l'efficacité du comptage et de la calibration des anguillettes :

- le compteur permet une détection des anguillettes de longueur supérieure à 125 mm : la détection est partielle (10 % à 90 %) pour des longueurs comprises entre 125 et 160 mm et totale pour les tailles supérieures ;
- le comptage s'avère très performant : fiabilité supérieure à 99 % pour des passages de plusieurs milliers d'individus (contrôle de 38 000 individus en 2010 et 59 000 en 2008), avec des pics journaliers supérieurs à 11 000 individus et des pics horaires de l'ordre de 1 600 individus ;
- la biométrie (mesure de la taille et du poids) à partir du signal enregistré par le compteur est très satisfaisante dès lors que l'on veut caractériser la population migrante (passages de plusieurs dizaines d'individus). Elle s'avère en revanche trop dispersée pour mesurer de façon précise les très petits effectifs.



Résultats obtenus avec le compteur ELFES-ELTA sur la passe de Golfech en 2010. Comparaison des comptages automatiques et manuels (A) et exemple de résultats biologiques: taille des anguilles ayant emprunté la passe (B), migration journalière (C) et horaire (D).

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Diagnostic de l'efficacité d'un ouvrage et suivi des stocks d'anguilles

Transfert technologique : Le compteur est parfaitement adapté à la collecte précise d'informations biologiques à diverses échelles (horaire, journalière, annuelle) pour des anguillettes de taille supérieure à 125mm. Il nécessite une alimentation électrique (220 volts) et réclame une surveillance fréquente (2 à 3 fois par semaine) pour contrôler certains paramètres tels que le débit délivré dans les tubes et la qualité des données enregistrées.

Pour les sites à migration importante (pics journaliers supérieurs à 5 000 individus), le compteur doit être couplé à un micro-ordinateur qui sert de stockage de masse des données. Le travail de validation et de tri des données enregistrées est de l'ordre d'une à deux journées pour une saison de migration.

L'ordre de grandeur du coût de l'appareil est de 9 000€ à 10 000€ selon les options (GSM pour le transfert des données, installation...).

La limite d'utilisation du compteur réside dans l'impossibilité de détecter des anguilles de taille inférieure à 125mm, ce qui nécessite de corriger les comptages par des mesures biométriques régulières de façon à évaluer la fraction de la population non détectée.

Perspectives : Il serait intéressant de poursuivre les investigations sur ce type de compteur de façon à pouvoir compter les civelles et anguillettes de petite taille.

Partenaires : MIGADO (Laurent Carry)

Pour en savoir plus :

Note technique : Compteur automatique à résistivité pour anguillettes ELFES-ELTA. Mise au point en laboratoire et tests *in situ*. Rapport EDF-MIGADO (à paraître).

Le dispositif est commercialisé par la Société Kraft Werk (kraftwerk2@wanadoo.fr)

Contacts : Laurent Carry (carry.migado@wanadoo.fr), François Travade (francois.travade@edf.fr)

Evaluation *in situ* des mortalités dans des turbines de grande taille

Responsables scientifiques :
Eric de Oliveira (EDF R&D – LNHE),
Franck Pressiat (CNR ingenierie).

Grande turbine - © M. Zylberblat



1. Contexte général de l'action

L'établissement des formules prédictives de la mortalité lors du passage d'anguilles dans les turbines nécessite des mesures *in situ* de ces mortalités. Les résultats expérimentaux disponibles à ce jour sont peu nombreux pour les turbines de grande taille, ce qui rend l'extrapolation de formules prédictives délicate.

2. Objectifs de l'action

Il s'agit de quantifier *in situ* les taux de mortalité et de blessure d'anguilles dévalantes sur deux types de turbines de grande taille (Kaplan et Bulbe), représentatives des aménagements du Rhin et du Rhône.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Trois usines ont été retenues pour réaliser ces tests : deux turbines Kaplan sur le Rhin (4 et 5 pales) et une turbine Bulbe sur le Rhône. Les tests des turbines du Rhin ont été réalisés sous la direction d'EDF en 2009 et 2010 et la turbine du Rhône par la CNR en 2010. Les poissons utilisés sont représentatifs des classes de taille des anguilles argentées, en phase de dévalaison (60 – 90 cm avec une moyenne de 70 cm environ).

La mesure de mortalité/survie dans les turbines de grande dimension comme celles du Rhin et du Rhône a été réalisée à l'aide d'une technique de marquage/recapture associée à une méthode permettant d'estimer *in situ* les mortalités de poissons passant au travers de turbines. Cette technique, dénommée « HI-Z tag » et développée par le bureau d'étude *Normandeaun Associates Inc* (USA), consiste à injecter un nombre déterminé de poissons au plus près de la turbine et de les recapter à l'aval. Chaque poisson est équipé de ballonnets qui se gonflent après le passage dans la turbine et ramènent le poisson en surface, permettant ainsi sa recapture. Chaque individu est ensuite examiné puis mis en stabulation pendant 48 heures pour examen des éventuelles mortalités différées. Une description des blessures et des lésions est enregistrée afin d'en déterminer les causes. Les taux de survie à 1 heure et 48 heures après lâcher, les taux de blessure et les taux de poissons indemnes sont estimés.

Deux systèmes d'injection des anguilles sont nécessaires. Le premier, installé en amont, a pour but d'injecter les poissons au plus près de la turbine. Le second, installé à l'aval (sans passage des poissons par la turbine) permet de contrôler que le marquage et le système d'injection n'entraînent pas de blessure ou de mortalité (biais qui ne seraient pas imputables à la turbine). Les dispositifs de marquage et d'injection, qui doivent être identiques en tous points, ont été fabriqués à EDF R&D avec l'appui de la société Normandeaun. Ils ont été utilisés pour les trois tests.

Le premier test, réalisé à Fessenheim, a permis d'adapter et de valider le protocole entre EDF R&D et Normandeaun Ass.



Bac de marquage et système d'injection (© E. De Oliveira)



Anguille recapturée (© E. De Oliveira)

Pour chaque test, un minimum de 350 anguilles a été injecté : près de 300 individus ont été injectés dans la turbine pour chaque site et 50 individus injectés à l'aval de l'usine pour le contrôle de la référence (sans passage par la turbine).

4. Résultats

La combinaison entre les forts taux de recapture (96 % à Fessenheim, 98 % à Ottmarsheim, 95 % à Beaucaire) et les taux de survie élevés des individus injectés au point de contrôle (98,6 % à Fessenheim, 100 % à Ottmarsheim, 100 % à Beaucaire) assure la validité et une bonne précision des taux de survie et du taux de blessure (+/- 5 %). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

Sites	Caractéristiques des turbines /ouvrage			Taux de survie		Taux de blessure	% d'individus indemnes
	Diamètre	Nbre tours/min	H chute	1 heure	48 heures		
Fessenheim Kaplan 4 pales	6,67m	88,2	15,7m	93.2 %	92.4 %	7.4 %	92.6 %
Ottmarsheim Kaplan 5 pales	6,25m	93,7	15,5m	82.6 %	78.6 %	27.6 %	72.5 %
Beaucaire Bulbe 4 pales	6,24	94	16m	95.6 %	92.3 %	8.4 %	91.6 %

Les principales causes de blessures et de mortalité sont attribuées à des chocs mécaniques avec les pales ou avec d'autres composants structurels de la turbine. Pour Fessenheim et Beaucaire, les taux de mortalité mesurés s'avèrent moins élevés que les taux attendus au vu des mesures réalisés sur d'autres sites (USA, Canada, Hollande, ...) qui oscillaient entre 15 et 25 % de mortalité.

Pour Ottmarsheim, les taux de mortalité et de blessures apparaissent plus élevés que sur les deux autres sites. Ces résultats sont difficiles à expliquer en l'état des connaissances. Cependant, même si le nombre de pales semble pouvoir expliquer en partie ces différences, d'autres tests menés par la société Normandeau, sur le brochet, ont abouti à des résultats inverses concernant la relation entre le taux de blessure et le nombre de pales d'une turbine.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Diagnostic des impacts des installations hydroélectriques

Transfert technologique : Les résultats obtenus vont alimenter et donc améliorer la précision des formules prédictives de mortalité des poissons franchissant ces types de turbine de grandes tailles. En complétant les résultats avec une connaissance des modalités de dévalaison des anguilles argentées et de la répartition entre les différentes voies de franchissement des aménagements hydroélectriques (turbine, écluse, barrage), il sera alors possible d'apprécier plus précisément l'incidence des ouvrages hydroélectriques des grands fleuves sur les populations d'anguilles dévalantes.

Les fortes différences entre les résultats obtenus avec une turbine 4 pales et une turbine 5 pales demandent de plus amples recherches afin d'améliorer les formules prédictives. La forme des pales semble par ailleurs avoir un impact important sur la survie des poissons et doit être prise en compte.

Perspective : Il semble nécessaire de prendre en compte les profils des pales ; plus les pales sont fines et plus le taux de blessure est important. Ce résultat *in situ* a été confirmé par des tests en laboratoire menés aux USA. Ces résultats et ces incertitudes incitent à poursuivre les recherches afin de comprendre les écarts observés. Pour cela, les plans précis des pales des turbines testées seront récupérés et des échanges avec le fabricant des turbines et l'Onema sont prévus.

Partenaires : Onema, Normandeau Associates, Association Saumon Rhin, Agence de l'eau Rhin-Meuse (co-financier de l'action), Association Migrateurs Rhône Méditerranée, Petite Camargue Alsacienne

Pour en savoir plus :

Mathur, D., P.G. Heisey, E.T. Euston, J.R. Skalski, and S. Hays. 1996. Turbine passage survival estimation for Chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. *Can. Jour. Fish. Aquat. Sci.* 53:542-549.

Contacts : Eric De Oliveira (eric.de-oliveira@edf.fr), Sébastien Manné (sebastien.manne@Onema.fr)
Franck Pressiat (f.pressiat@cnr.tm.fr), Marc Zylberblat (m.zylberblat@cnr.tm.fr)

Etablissement de formules prédictives de mortalité des anguilles lors du transit à travers les turbines Kaplan

[Fiche 7]

Responsables scientifiques :
Peggy Gomes (Onema),
Michel Larinier, (Onema).

Centrale hydroélectrique - vue aval - © P. Gomes



1. Contexte général de l'action

L'évaluation de l'impact des aménagements hydroélectriques est indispensable au diagnostic du taux d'échappement à l'échelle des axes de migration. L'impact d'un aménagement hydroélectrique est lié à la probabilité d'entraînement des individus dans la prise d'eau (fonction de sa configuration, du débit d'équipement de la centrale et des conditions de débit en période de dévalaison), ainsi qu'à l'importance des dommages subis par la fraction du stock transitant par les turbines. Les évaluations par expérimentations systématiques *in situ* des dommages potentiels induits par le passage par les turbines ne sont pas envisageables sur chaque installation, compte tenu de la lourdeur et du coût des opérations. Les dommages sur une turbine donnée peuvent par contre être approchés par extrapolation des résultats de tests effectués sur des turbines de caractéristiques voisines ou par le recours à des formules prédictives établies à partir des résultats des expérimentations effectuées sur d'autres sites.

2. Objectifs de l'action

L'action avait pour objectifs :

- d'effectuer un recueil et une analyse de l'ensemble des données disponibles concernant les dommages occasionnés par les turbines Kaplan sur les anguilles, données issues de la littérature scientifique et technique ;
- de mettre en évidence les principaux facteurs susceptibles d'induire des dommages ;
- d'établir des formules prédictives de mortalité sur la base des résultats des tests expérimentaux considérés comme valables.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Le travail repose sur les données issues des expérimentations réalisées sur 24 sites en Europe et Amérique du Nord. Il a été structuré en plusieurs étapes :

- analyse critique des 71 essais réalisés sur 15 sites pour lesquels on dispose de toutes les informations nécessaires et sélection des tests pertinents (29 essais à pleine ouverture des pales des turbines) ;
- compilation des données de chacun des tests en terme de pourcentage de mortalité, de caractéristiques des turbines (hauteur de chute, débit nominal, nombre de pales, diamètre...) et de conditions de fonctionnement lors des essais (débit, degré d'ouverture du distributeur) ;
- analyse des facteurs de mortalité et examen des différentes approches possibles pour l'établissement de modèles prédictifs ;
- établissement de formules par traitement statistique ;
- tests de cohérence des différentes formules obtenues sur 67 turbines équipant des installations situées pour la plupart en France.

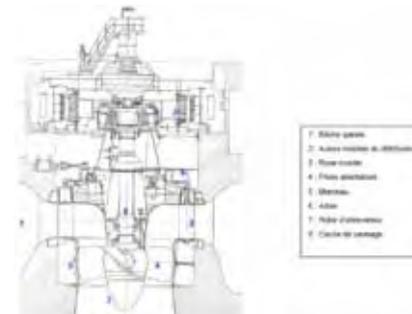


Schéma d'un exemple de turbine Kaplan sur l'aménagement d'Ottmarsheim (France) (d'après Vivier, 1966)



Hélice de turbine Kaplan à 3 pales - © M. Larinier

4. Résultats

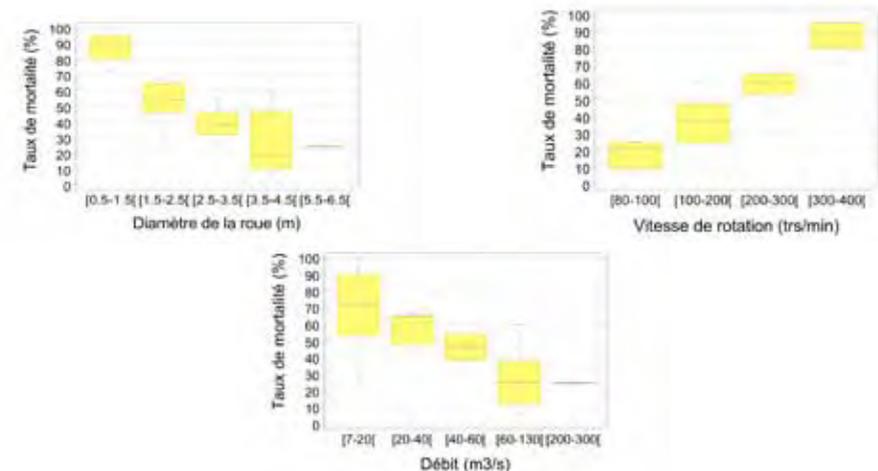
Les expérimentations mettent en évidence des taux de mortalité très variables selon les sites et les turbines. De façon générale, l'importance des dommages augmente avec la taille de l'anguille et la vitesse de rotation de la turbine, et diminue avec le diamètre et le débit nominal de la turbine. Ces mortalités varient d'environ 5 à 10 % pour les grosses turbines de basses chutes à plus de 80 % pour les petites turbines Kaplan à forte vitesse de rotation.

Trois expressions mathématiques ont été établies à partir des essais effectués à ouverture supérieure à 70 % et en s'appuyant uniquement sur des données facilement accessibles. Ces expressions permettent d'obtenir l'ordre de grandeur de la mortalité (M) en fonction de la taille de l'anguille (TL), du diamètre de la roue (Dr), du débit nominal (Q) et de la vitesse de rotation de la turbine (N).

$$M(\%) = 4.67 \times TL^{1.53} \times Dr^{-0.48} \times N^{0.6}$$

$$M(\%) = 6.59 \times TL^{1.63} \times Q^{-0.24} \times N^{0.63}$$

$$M(\%) = 12.42 \times TL^{1.56} \times Q^{-0.22} \times Dr^{-0.10} \times N^{0.49}$$



Variation des taux de mortalité des anguilles lors de leur passage dans les turbines Kaplan en fonction de différentes caractéristiques de ces turbines.

L'application à une soixantaine de turbines Kaplan a permis de valider la cohérence des 3 formules. Elles sont à utiliser selon la disponibilité des données concernant les aménagements hydroélectriques diagnostiqués.

Le fait que ni le nombre de pales, ni la hauteur de chute n'interviennent dans les formules prédictives, s'explique par le nombre limité de tests et surtout l'absence de données pour certaines architectures de turbines Kaplan. La majorité des turbines testées sont à 4 pales, celles à 3 et 5 pales ou plus étant très limitées. On a d'autre part une sous-représentation des turbines de puissances inférieures à 500 kW fonctionnant sous très basses chutes (< 3-4 m) ainsi que des grosses turbines de 10 à 50 MW à débits supérieurs à 150 m³/s fonctionnant sous 10 à 20 m de chute.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Domaine d'application : diagnostic des impacts des installations hydroélectriques

Transfert technologique : Les formules disponibles s'appliquent pour les turbines Kaplan classiques qui équipent actuellement une large part du parc de centrales de basse chute ; elles ne sont par contre pas applicables pour les turbines ichtyocompatibles (de type *Very Low Heid* (VLH)). Les formules peuvent être utilisées dès l'instant où les informations recueillies sur les caractéristiques des turbines ont été validées. Sur un site donné, elles permettent d'estimer les dommages sur la fraction du stock d'anguille argentée dévalante transitant par les turbines, cette fraction du stock étant estimée par ailleurs.

Perspective : Ce travail devra être repris et complété afin d'intégrer les expérimentations *in situ* réalisées dans le cadre du présent programme R&D sur les grosses turbines Kaplan ou bulbe du Rhin (Fessenheim, Ottmarsheim) et du Rhône (Beaucaire).

Pour en savoir plus :

P. GOMES, M. LARINIER., 2008. Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. Rapport Onema - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 38p et annexes.

Contacts : Peggy Gomes (peggy.gomes@imft.fr ou peggy.gomes@onema.fr)

Evaluation des dommages cumulés causés par les aménagements hydroélectriques sur la dévalaison des anguilles argentées à l'échelle d'un axe de cours d'eau

Responsables scientifiques :
Peggy Gomes (Onema), Michel Larinier (Onema), Philippe Baran (Onema).

Centrale Hydroélectrique - vue aval - © P. Gomes



1. Contexte général de l'action

La mise en œuvre de mesures d'atténuation des impacts des installations hydroélectriques à l'échelle d'un axe de cours d'eau réclame, au préalable, une quantification de ces dommages à l'échelle à la fois de chaque aménagement et du cours d'eau. Cette quantification doit s'appuyer sur la connaissance de l'activité migratoire, de la répartition des poissons entre les différentes voies de passage au droit des ouvrages et des dommages subis lors du passage au travers des évacuateurs et des turbines. Ces actions du programme ayant permis des avancées significatives dans ces trois directions, il devenait alors possible de développer et d'appliquer sur des cas concrets une méthodologie destinée à évaluer les taux d'échappement à l'échelle de l'ensemble d'un axe de migration.

2. Objectifs de l'action

L'action visait à :

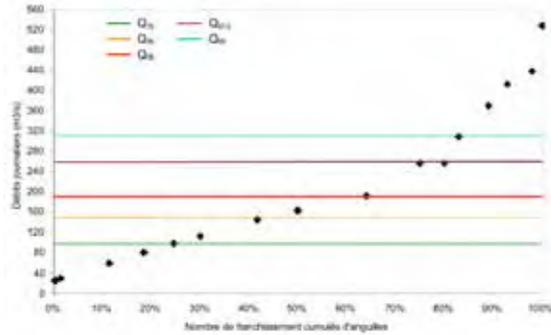
- définir les différentes étapes de la démarche permettant l'estimation des dommages à l'échelle d'un ouvrage et d'un axe de cours d'eau ;
- mettre au point les protocoles de récoltes des données indispensables ;
- tester l'ensemble de la méthodologie sur différents cours d'eau.

3. Sites d'étude – Méthodologies

La méthodologie a consisté à exploiter les résultats et assembler les modèles acquis en parallèle au cours d'actions du programme de façon à développer des outils permettant d'effectuer une évaluation quantitative des dommages causés par un aménagement hydroélectrique sur la dévalaison de l'anguille et de conduire un diagnostic de l'impact à l'échelle d'un axe. Ces outils devaient être à la fois pertinents d'un point de vue biologique et reposer sur des informations assez facilement accessibles. Cette méthodologie d'estimation repose sur :

- un modèle d'estimation des variations de flux d'anguilles argentées au droit d'une centrale hydroélectrique : il peut reposer soit sur une évaluation journalière des quantités d'anguilles en fonction de certains paramètres environnementaux (météorologie, hydrologie, turbidité) soit sur une évaluation plus globale par gamme de débits caractéristiques du cours d'eau lors de la période de dévalaison. Cette seconde approche a été privilégiée car elle s'appuie sur des données environnementales (courbe des débits classés) assez facilement accessibles. Le traitement des 562 franchissements d'ouvrages sur le Gave de Pau a permis de définir globalement la fraction d'anguilles dévalant pour une valeur caractéristique de débit classé de la période de migration. On a constaté une équipartition des passages entre les débits Q_{75} Q_{90} Q_{95} $Q_{97,5}$ Q_{99} ;

Courbe des franchissements cumulés d'anguilles en dévalaison sur le Gave de Pau en fonction de l'hydrologie de la période de migration.



une enquête auprès des exploitants. La cohérence de ces informations doit être validée. Concernant les populations d'anguilles du cours d'eau, la répartition des abondances d'anguilles argentées doit être réalisée dans le bassin versant soit en considérant les surfaces de bassins, soit le linéaire de cours d'eau. Trois tailles représentatives sont choisies (15 à 30 jours de travail pour des axes avec 15 à 25 ouvrages).

• **Etape 2** - Mise en œuvre des estimations à l'échelle d'un ouvrage
 Pour chaque ouvrage et chaque valeur de débits classés annuelle, la fraction d'anguilles dévalant d'une taille donnée (modèle 1) est répartie entre les évacuateurs et les turbines (modèle 2). On fait généralement l'hypothèse que le passage par les ouvrages évacuateurs se fait sans dommage notable. La fraction transitant par les turbines est affectée d'un taux de mortalité (modèle 3). Un taux d'échappement moyen de la centrale étudié est calculé sur la base des taux d'échappement évalué sur une dizaine d'années.

• **Etape 3** - Mise en œuvre des estimations à l'échelle d'un axe
 Ces estimations sont effectuées sur le stock d'anguilles présentes en amont de chaque aménagement, soit issues des habitats du tronçon, soit de la dévalaison d'un tronçon situé en amont d'un autre ouvrage (5 jours de travail pour un axe à 15-20 ouvrages).

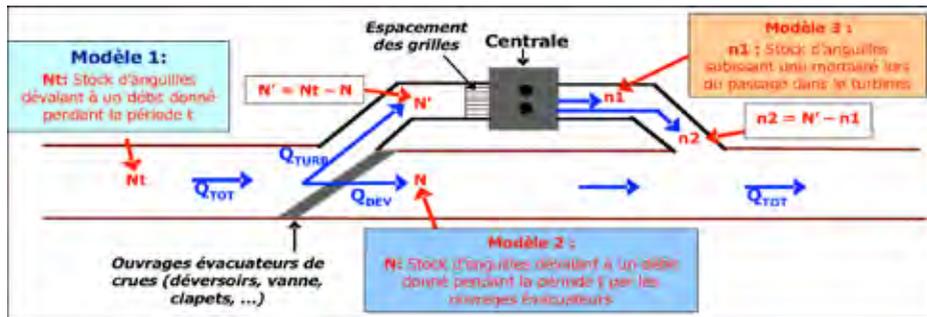
La méthodologie permet d'obtenir pour chaque année et pour une période donnée un taux d'échappement à chaque ouvrage ainsi qu'un taux global correspondant à la fraction d'anguilles ayant survécu aux passages des différentes centrales hydroélectriques. La variabilité interannuelle de ce taux d'échappement peut être appréhendée en fonction de l'hydrologie. Appliquée à un cours d'eau du Sud-Ouest équipé de 26 aménagements, elle a permis d'estimer des taux d'échappement sur l'ensemble de l'axe variant de 33 % à 66 % avec une moyenne de 49 %.

Recommandation : hormis les formules de mortalités par les turbines, les éléments de la méthode sont issus des suivis pluriannuels d'anguilles dévalantes sur une série de 6 aménagements hydroélectriques sur le Gave de Pau (régime hydrologique nivo-pluvial). Les périodes et les débits caractéristiques de la dévalaison sont susceptibles de varier dans d'autres contextes hydrologiques et peuvent être affinés si des informations sur les rythmes de dévalaison sont disponibles localement.

- un modèle de répartition des flux au droit des prises d'eau des installations hydroélectriques. Ce modèle est issu des traitements statistiques (modèle GLM) des 476 franchissements d'ouvrages hydroélectriques sur le Gave de Pau en fonction du rapport débit déversé sur débit total du cours d'eau. Ce rapport est fortement lié au débit d'équipement de la centrale considérée ;
- un modèle d'estimation des dommages potentiels subis par la part du flux migrant transitant par les turbines. Ce modèle provient des analyses conduites dans une des actions qui a permis d'établir des relations liant les dommages à la taille des anguilles et aux caractéristiques des turbines, à partir du recueil et de l'analyse des résultats de toutes les expérimentations in situ significatives effectuées en Europe et en Amérique du Nord. Le traitement de 29 tests issus de la littérature scientifique et technique a permis de proposer une relation entre le taux de mortalité, certaines caractéristiques de la turbine (diamètre, vitesse de rotation, débit nominal) et la taille de l'anguille.

4. Résultats

- Emboîtement des modèles



- Mise en œuvre de la méthodologie d'estimation

- **Etape 1** - Récolte des données
 Les données hydrologiques sont issues de la Banque Hydro sur la base des débits journaliers de la période de migration de dévalaison de l'anguille (à définir selon les connaissances locales). Les données sont recalculées au droit de chaque ouvrage au prorata de la surface de bassin versant. Pour chaque année où les données sont disponibles et avérées, les valeurs caractéristiques des débits classés (Q75, Q90, Q95, Q97.5, Q99) sont calculées. Les informations sur les aménagements hydroélectriques doivent être récoltées pour chaque ouvrage sur la base des informations disponibles auprès des services de l'Etat et complétées par

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Diagnostic de l'impact des usines hydroélectrique sur la dévalaison des anguilles argentées

Transfert technologique : L'action a permis de disposer d'une méthodologie d'estimation des impacts cumulés des centrales hydroélectriques sur un axe de rivière. Ces estimations doivent être mises en œuvre sur la base de données validées et faire l'objet d'expertise. Elles permettent de comparer les aménagements entre eux et de prioriser les actions à mettre en œuvre pour améliorer le taux d'échappement.

Partenaires : DDT des Pyrénées-Atlantiques, ECOGEA.

Pour en savoir plus :

Bruno VOEGTLE, Michel LARINIER, 2008. Définition d'une stratégie de restauration de l'axe de migration pour l'anguille. Cours d'eau du Gave de Pau. Rapport ECOGEA/MIDIVAL/Onema- Programme R&D Anguilles/Ouvrage,

Contacts : Philippe Baran (philippe.baran@imft.fr ou philippe.baran@onema.fr), Peggy Gomes (peggy.gomes@imft.fr ou peggy.gomes@onema.fr)

Prédiction des flux dévalants d'anguilles en fonction de facteurs environnementaux : développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage

Fiche 9

Responsable scientifique :
Anthony Acou (MNHN)



Pêcherie Loire - © A. Accou

1. Contexte général de l'action

Une option envisagée pour réduire les mortalités d'anguilles argentées lors de leur transit dans les turbines hydroélectriques consiste à procéder à des arrêts de turbinage. Pour qu'ils soient efficaces et opérationnels, ils doivent (i) intervenir quand l'activité migratoire est la plus forte et (ii) être prévisibles (au moins à 24h) pour permettre aux gestionnaires d'anticiper la manœuvre d'ouvrages.

2. Objectifs de l'action

- sélectionner les facteurs du milieu qui permettent de caractériser les fenêtres environnementales de migration (analyse bibliographique) ;
- modéliser les captures par unité d'effort (CPUE = nombre d'anguilles argentées par nuit de pêche) en fonction de facteurs susceptibles d'influencer la migration de dévalaison ;
- utiliser les prédictions du modèle pour cibler les arrêts de turbinage d'une centrale hydroélectrique fictive située dans la zone d'étude, et estimer ainsi l'apport du modèle pour la gestion du turbinage.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Le site d'étude : la Loire (entre Angers et Nantes), seul site en France où des séries de captures à long terme d'anguilles argentées sont disponibles grâce à la présence d'une pêcheur professionnelle organisée.

Les données de captures : une série de vingt années (1987-2006) de captures journalières réalisées aux guideaux correspondant à la moyenne des captures issues de quatre pêcheur. Le guideau est un engin spécifique pour capturer l'anguille d'avalaison qui s'apparente à un chalut immobile malgré le courant grâce à un système d'ancrage et de câblage.

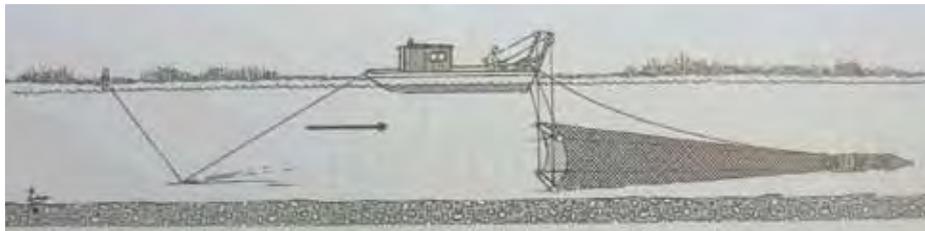
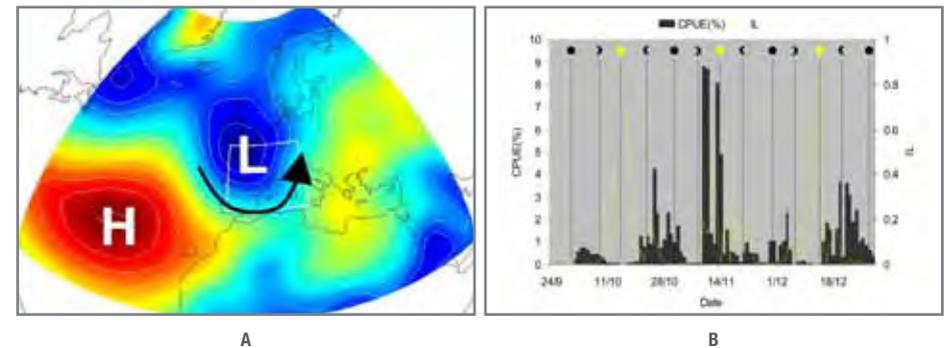


Schéma d'un guideau en pêche (Source: Guide des engins de pêche fluviale et lacustre, CSP, 2003).

Les variables environnementales et temporelles utilisées :

- la variation journalière de débit (ΔQ , en %) ;
- la turbidité (TURB, en NTU = *Nephelometric Turbidity Unit*) qui quantifie la lumière perçue par l'anguille dans la colonne d'eau ;
- l'indice de luminosité (IL, sans unité ; Cairns & Hooley, 2002) qui quantifie l'éclairement nocturne total à partir des phases lunaires et de la nébulosité. L'IL varie entre 0 (correspond par exemple à une nouvelle lune avec une nébulosité maximale) et 1 (pleine lune toute la nuit sans nuage). Malgré une pleine lune, l'IL peut être nul en raison d'une couverture nuageuse maximale (nuit du 14/11/1997, Fig. B). L'IL fournit chaque nuit une estimation beaucoup plus fine de la lumière perçue par les anguilles à la surface de l'eau par rapport à l'utilisation classique des phases lunaires ;
- le type de temps qui décrit l'ambiance atmosphérique (TEMPS, Paquet *et al.*, 2006) selon 8 modalités (dépression centrale, anticyclone, retour d'est, etc.) ;
- le numéro de la semaine (SEM).



A. Représentation d'un type de temps. L et H : zones de basses et hautes pressions atmosphériques. La flèche noire indique la direction et la forme du front dépressionnaire.

B. Evolution des CPUE d'anguilles argentées (saison 1997) en fonction de l'indice de luminosité (IL) et des phases lunaires.

Le modèle (delta-GLM) :

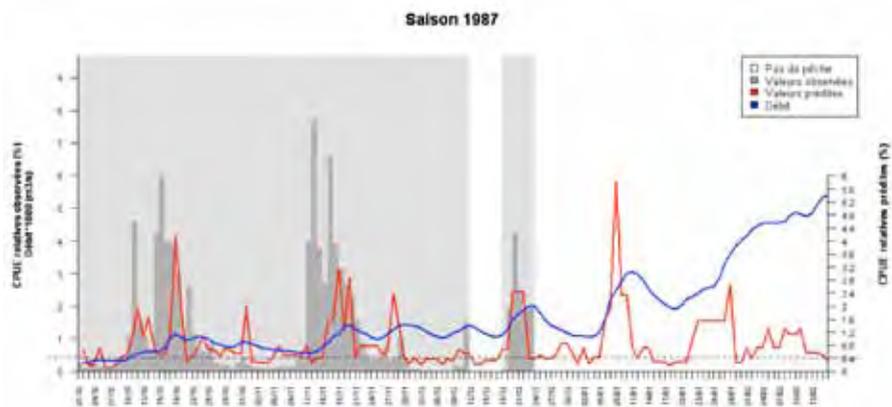
- produit d'un modèle de présence-absence (régression logistique) et d'un modèle linéaire simulant les CPUE relatives (% journaliers de la capture annuelle) ;
- validation croisée type « Leave-One-Out ». Cette technique consiste à tester la robustesse du modèle en multipliant les validations sur des années indépendantes. Appliquée à notre jeu de données, cela consiste à modéliser 20 fois les CPUE sur les différentes combinaisons de 19 années parmi les 20 de la période d'étude (« années d'apprentissage »), et tester 20 fois les prédictions sur l'année « test » restante. Cette analyse vise donc à dégager l'architecture d'un modèle final qui sera construit cette fois sur les 20 années.

4. Résultats

- 90% des modèles construits possédaient la même « architecture », ce qui suggère qu'ils étaient robustes car peu sensibles à la période d'apprentissage

$$CPUE_i = IL + \Delta Q_{i-1} + TURB_{i-1} + SEM + TEMPS$$

- grâce à l'introduction d'un délai à 1 jour (pour ΔQ et $TURB$), les captures peuvent être prédites à 24h ;
- le modèle final (construit sur les 20 années) prédit bien les captures (~ 80% des pics observés sont prédits).



Graphique des CPUE relatives observées et prédites par le modèle pour l'année 1987.

Scénario	Critère utilisé pour réaliser un arrêt	Echappement moyen annuel (% min-max) en anguilles argentées	Nombre moyen annuel d'arrêt de turbines (en nuits min-max)
Arrêt des turbines pendant toute la durée de la migration (1-oct → 31-jan)	aucun	100	120
Scénario hydrologique	$Q \geq$ au module (806 m ³ /s)	45 (0-86)	63 (0-117)
Modèle	$CPUE_p \geq VS$ haute ¹ $CPUE_p \geq VS$ basse ¹	40 (17-61) 70 (40-90)	13 (7-25) 40 (24-60)

¹ $CPUE_p$ = CPUE prédite par le modèle ; VS = Valeur seuil de $CPUE_p$ utilisée pour réaliser un arrêt de turbine

Echappement en anguilles argentées et nombre de nuits d'arrêts de turbinage moyens annuels réalisés sur l'ensemble de la période d'étude (1987-2006) en fonction de différents scénarios.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des centrales hydroélectriques

Transfert technologique : Des arrêts de turbinage ont été simulés dans la zone d'étude. Les résultats montrent que si la gestion ne s'était basée que sur une valeur de débit seuil pour cibler les arrêts de turbine (scénario hydrologique), un échappement moyen annuel de 45 % des anguilles argentées aurait été obtenu pour environ 63 nuits d'arrêts de turbinage sur l'ensemble de la période d'étude. Comparativement, l'utilisation du modèle permet d'augmenter considérablement ce compromis échappement/nombre de nuits d'arrêt de turbinage.

Perspectives : Ce modèle permettrait une gestion efficace d'une centrale hydroélectrique fictive localisée dans la partie moyenne de la Loire. Une phase essentielle qui consiste à extrapoler ce modèle et tester ses prédictions dans d'autres bassins versants (Dordogne) est en cours. Les résultats obtenus seront précieux pour procéder à des ajustements du modèle et en généraliser éventuellement l'utilisation. Parallèlement, un étude de modélisation est en cours sur des cours d'eau de petite taille pour examiner si un nombre plus restreint de paramètres environnementaux (variation de débit, pluie) permettrait d'expliquer les rythmes de dévalaison.

Partenaires : AAIPPBLB (Phillipe Boisneau), EDF (François Travade, Eric de Oliveira, Régis Thévenet), Université de Tours (Catherine Boisneau), MNHN (Eric Feunteun).

Pour en savoir plus :

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.

Contacts : Anthony Acou (acou@mnhn.fr)



Le programme s'est énormément investi sur la mise au point et le test de solutions techniques permettant de limiter les impacts des ouvrages transversaux et notamment ceux des centrales hydroélectriques. Dès les ouvrages à marée, des tests ont pu être conduits pour améliorer le franchissement des civelles de la même façon que les passes à brosse ont pu être adaptées aux barrages de grande hauteur.

Mais c'est surtout dans le domaine de la dévalaison que l'innovation a été la plus marquée au cours du programme. Du dimensionnement de prises d'eau ichtyocompatibles aux barrières comportementales en passant par les turbines ichthyophiles® et les stratégies d'arrêt de turbinage, de nombreuses solutions ont été explorées afin d'être validées ou non pour leur mise en œuvre sur le terrain dans le respect des équilibres coût/efficacité.

SOLUTION TECHNIQUE

Gestion hivernale des 1^{ers} ouvrages à la mer pour le franchissement des anguilles. Tests d'admission limités

[Fiche 10]

Responsables scientifiques :
Christian Rigaud (Irstea),
Baran Philippe (Onema).

Porte flot fermée - © P. Baran



1. Contexte général de l'action

Au niveau de la zone soumise à marée, des ouvrages permettent de gérer l'alimentation de marais salés endigués ou de limiter la remontée des eaux salées et/ou les submersions régulières dans les territoires amont gérés en eau douce. De par leur mode d'utilisation, ils peuvent entraver la libre circulation des jeunes anguilles vers des habitats souvent intéressants. Face à la diversité de ces ouvrages, il est utile de disposer d'une palette de solutions de gestion. En France, des essais ont déjà été réalisés ou sont en cours, mis en œuvre par des associations migrateurs (Logrami, Migado, ...), des structures locales (IAV, Parc de Brière, Parc du Marais poitevin), des équipes universitaires (Université de Rennes, Agro Rennes), des bureaux d'études (Ecogea, Fish Pass) ou des équipes de l'Onema.

2. Objectifs de l'action

L'action visait à :

- une analyse des connaissances disponibles sur ces ouvrages et leur gestion vis-à-vis de la migration de l'anguille avec une proposition de typologie ;
- évaluer l'efficacité d'une admission hivernale d'eau salée, régulière et de volume limité, de jour et de nuit vis-à-vis du franchissement des civelles.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Pour suivre les effets de cette modalité de gestion, un site d'étude a été choisi sur un tributaire de l'estuaire aval de la Charente. Cet ouvrage (Charras) est constitué de deux passages avec une porte à flot en aval et une vanne à double vantelle en amont. Il contrôle 235 km² de bassin versant et de marais doux. L'Union des Syndicats de MARais de Charente-Maritime (UNIMA) a souhaité y tester la pose de cales en bois de 10 cm empêchant la fermeture complète de l'une des portes à flot. Au niveau de la vanne, l'admission a été réalisée en surverse en 2010 et sur la moitié des envois de 2011 ou par le fond sur l'autre moitié des envois 2011.

Huit campagnes ont été réalisées avec pour chacune d'elles 4 marées successives (2 diurnes, 2 nocturnes). Au cours de ces 32 marées, les échantillonnages biologiques ont été effectués toutes les vingt minutes en aval et au niveau de la vanne amont afin de suivre l'évolution du niveau de présence des civelles en aval de l'ouvrage et dans la masse d'eau admise en amont. Les niveaux d'eau amont et aval ont été suivis en continu ainsi que l'évolution de la salinité. Des dosages de matières en suspension ont été réalisés sur 4 marées.



Vue aval de l'ouvrage de Charras (portes à flot fermées à pleine mer) - © P. Baran



Dispositif de filtration des entrées par surverse. Relevé toutes les 15 minutes au cours de l'envoi - © P. Baran

4. Résultats

Typologie des ouvrages

En estuaire ouvert, les zones soumises à une salinité de plus de 5 g/l représentent jusqu'à 50 % du territoire tidal. La gestion des nombreux ouvrages que l'on y trouve n'intègre pas ou peu d'admissions salées vers l'amont surtout en période d'apports faibles d'eau douce (souvent dès mai, voire avant) qui réduisent les possibilités de dilution, l'attractivité générale de l'ouvrage et celle d'une éventuelle rampe.



Portes à flots et clapets ouverts lors du jusant - © P. Baran



Clapets de régulation - © P. Baran



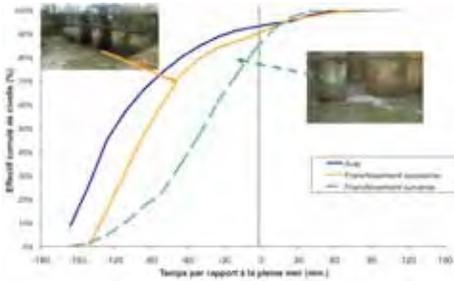
Vannes de régulation du niveau d'eau en amont - © P. Baran

Dans l'analyse du cas posé par chaque ouvrage, **trois aspects majeurs** doivent être pris en compte :

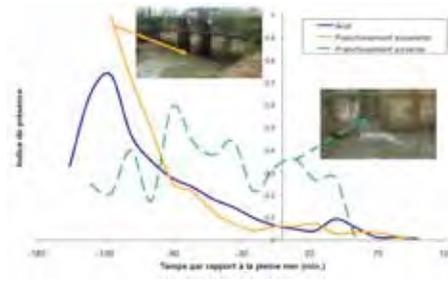
- **sa situation dans la zone soumise à marée** (salinité significative ou pas, sur l'axe majeur ou pas) ;
- **ses caractéristiques physiques** (portes, clapets, présence de vannages amont dispositifs particuliers...) ;
- **les caractéristiques de sa zone amont** qui vont influencer à la fois sur le niveau de contraintes en termes d'admission, sur l'importance de la ressource en eau douce hivernale et printanière et enfin sur la qualité et l'étendue des habitats.

Efficacité biologique d'une gestion hivernale d'un ouvrage à la mer

52 kg ont franchi l'ouvrage au cours des 32 marées (0,8 civelles/m³ admis, 6 900 m³/marée), 70 % des passages étant nocturnes. Lors des envois de fond (vanne décollée de 20 cm), la porte à flot ne se ferme presque jamais. Ils correspondent à des entrées de civelles supérieures de 37 % aux surverses, surtout de nuit, mais aussi à un volume admis 2,6 fois plus important. Les cinétiques de franchissement sont différentes selon le mode d'admission. Par le fond, le flux est similaire à celui se présentant en aval avec un maximum dès la pénétration de l'eau de mer (entre 1h50 et 2h30 avant la pleine mer, 75 % des passages en 1 heure). Par surverse, les passages sont retardés d'environ 30 min à 1 heure par rapport au pic de présence en aval et se font ensuite de manière plus étalée (75 % après 1h50 d'envoi).



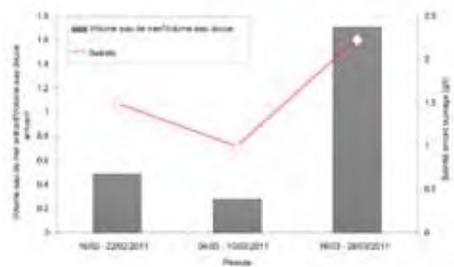
Courbes cumulées des captures de civelles en aval ou en franchissement de la vanne par surverse ou par le fond.



Indices de présence des civelles en aval et au niveau de la vanne amont, en passage par surverse ou par le fond.

Les arrivées de civelles en aval sont très variables en terme de quantité. Cette variabilité d'abondance sur la saison plaide pour une possibilité d'admission modérée permanente, d'ailleurs synonyme d'un fonctionnement hydrologique stable de la zone concernée plutôt que pour un ou des envois très ponctuels d'eau salée lors de 2 ou 3 marées dans la saison. Des dévalaisons de civelles sur le début du jusant ont été observées. Elles ne sont pas surprenantes au vu du comportement de ces jeunes stades en estuaire. Une évacuation modérée de l'eau en amont et le maintien d'un niveau dans le bief peuvent limiter ce phénomène.

D'un point de vue hydraulique, dans 50 % des cas, les volumes salés admis représentent environ 40 % des volumes d'eau s'accumulant en amont de l'ouvrage lors du flot avec une augmentation médiane de 5 cm de la hauteur d'eau dans le bief (7 km de long et 12 m de large). Ce rapport dépend du coefficient de marée, des conditions météorologiques, du mode de gestion de l'ouvrage et du débit amont du canal variant en hiver de 0,3 m³/s à 8 m³/s (médiane à 1 m³/s) pour un bassin versant de 33 km².



Evolution de la salinité des eaux en amont des portes en fonction du débit du canal.

En termes de salinité, les valeurs en amont de l'ouvrage traduisent des fluctuations suivant les marées variant entre 0,3 g/l et un maximum de 22 g/l. Il faut analyser les valeurs obtenues au cours des basses mers. En l'absence d'entrée d'eau de mer, la valeur moyenne est de 0,7 g/l alors qu'elle atteint 1,7 g/l en moyenne lors des périodes d'entrée d'eau salée.

Mais, l'évolution de cette salinité à basse mer dans le canal dépend des débits d'eau douce en transit. Lorsqu'ils passent de 1,2 m³/s à 0,25 m³/s, cette salinité augmente jusqu'à 2,2 g/l, soit une valeur 3 fois supérieure à la normale. Cette situation apparue en avril 2011 n'est pas compatible avec les usages amont.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des 1ers ouvrages à la mer

Transfert technologique : Les admissions d'eau en amont constituent des éléments de gestion rapides à mettre en œuvre, réversibles, assez peu coûteux et synonymes de passages significatifs d'individus notamment en phase

hivernale. Ils doivent s'appuyer de préférence sur des dispositifs pérennes assurant une admission limitée mais régulière et gérable grâce à une présence humaine. Trois situations sont à distinguer :

- **les ouvrages desservant des zones salées en amont** : les admissions peuvent avoir lieu toute l'année, les risques de débordement constituant la seule contrainte éventuelle ;
- **les ouvrages en sortie de zones gérées en eau douce** : les admissions hivernales se justifient surtout pour les ouvrages soumis en aval à des salinités significatives, s'accompagnant souvent de fortes densités de civelles, les risques portent surtout sur la salinité et les MES ;
- **les ouvrages soumis à marée situés plus en amont** : la faible salinité de l'eau qui se présente permet le plus souvent des admissions régulières au moins jusqu'au début de l'été.

Etape 1 - Analyse de l'ouvrage, de sa gestion et de ses contextes aval et amont :

- potentiel amont pour l'anguille et éventuels problèmes (assecs réguliers, pollutions aiguës, ...)
- contraintes d'usages du bief d'amont vis-à-vis de la salinité de l'eau, des MES et/ou des débordements, **cette analyse doit déboucher sur l'estimation du volume d'eau admissible en amont** ;
- caractéristiques physiques de l'ouvrage et sa position par rapport aux zones tidales (salinité significative ou pas en période hivernale) ;
- gestion mise en œuvre notamment en termes d'évacuation.

Etape 2 - Dimensionnement de la solution technique pour l'admission d'eau de mer :

- **porte à flot**. Solution de vantelles calées pour des admission d'eau de mer à des coefficients > 70 et gestion des vannages amont préférentiellement par sousverse; solution de vantelles dans les portes à marée calées pour des admissions d'eau de mer dès l'arrivée de la marée ou possibilité éventuelle d'installation de cales empêchant la fermeture complète des portes lorsque l'admission d'eau de mer n'est pas trop limité ;
- **clapets**. Équipement de système permettant soit le maintien d'une certaine ouverture lors du flot soit un retard à la fermeture ;
- **écluse**. Utilisation hivernale avec phase d'appel d'eau et phase d'admission.

Perspectives : Des expérimentations sur d'autres sites faisant l'objet de mesures spécifiques de gestion seront conduites afin d'obtenir le maximum d'informations sur des contexte géographiques différents pour y adapter les solution techniques appropriées.

Partenaires : UNIMA, Fédération pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques de Charente-Maritime

Pour en savoir plus :

M. LAMARQUE, C. RIGAUD, A ; ALRIC, P. BARAN, 2012. Evaluation du comportement des civelles au droit d'un ouvrage à la mer et test de la modalité de gestion hivernal. Rapport Onema/Irstea - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

Contacts : Philippe Baran (philippe.baran@imft.fr ou philippe.baran@onema.fr),
Christian Rigaud (Christian.Rigaud@irstea.fr)

Test d'une passe à anguille « à brosse » pour un barrage de grande hauteur – Golfech (Garonne)

[Fiche 11]

Responsable scientifique :
François Travade (EDF R&D)

Passes à brosse avec rampes et bacs de repos - Golfech - © L. Carry



1. Contexte général de l'action

Les passes spécifiques pour civelles ou anguillettes sont constituées de substrats de reptation (brosses, plots...) irrigués par un faible débit. Une passe de ce type a été installée en 2002 à l'usine hydroélectrique EDF de Golfech sur la Garonne (chute de 17 m) pour pallier l'efficacité insuffisante de l'ascenseur à poissons pour l'anguille. De 2002 à 2007, seule la partie aval de cette passe débouchant sur un piège (capture puis transfert manuel des anguilles à l'amont) a été construite. En 2008, cette passe a été étendue à la totalité de la chute. L'expérience néo-zélandaise sur des passes de hauteur importante faisant état de retour vers l'aval des anguilles avant leur arrivée au sommet de l'ouvrage nous a conduits à insérer dans la passe un « bassin tampon anti-retour ».

2. Objectifs de l'action

L'objectif de l'action était de valider *in situ* la fonctionnalité de la passe définitive.

3. Sites d'étude – Méthodologies

L'étude a été conduite durant 3 saisons de migration (de mai à juillet) de 2008 à 2010 sur la passe à anguille de l'usine de Golfech (Garonne) par l'association MIGADO en collaboration avec EDF R&D.

La passe à anguille est accolée à l'ascenseur à poissons de l'usine de Golfech. Longue de 40 mètres, elle se compose d'une série de rampes en PVC équipée de brosses synthétiques qui servent de substrat de reptation (matériel Fish Pass). Elle est composée de deux parties, la « passe aval » (dénivelé de 7 m), implantée dans la partie basse de l'ascenseur, qui débouche dans un bassin tampon, et la « passe amont » qui fait communiquer le bassin tampon avec le canal de transfert de l'ascenseur (dénivelé de 10 m). Les deux tronçons de passe sont irrigués par un débit de 2,5 l/s. Des bacs de repos sont disposés à intervalles réguliers. La partie amont de la passe est équipée d'un bassin de piégeage et d'un compteur automatique à résistivité. Trois détecteurs-enregistreurs de transpondeurs ont été implantés respectivement sur la passe aval, sur la passe amont en sortie du bassin tampon et au débouché amont de la passe.

Le protocole expérimental a consisté à comptabiliser les passages d'anguillettes dans le dispositif (piège et compteur), à contrôler les éventuelles accumulations d'anguilles dans le bassin tampon et à suivre le comportement de progression sur les rampes d'anguilles marquées par transpondeurs à l'aide des détecteurs.



Passes à anguille de l'usine de Golfech (Garonne). Vue générale.
© F. Travade EDF



Passes à anguille de l'usine de Golfech (Garonne). Détail de la passe aval.
© F. Travade EDF

4. Résultats

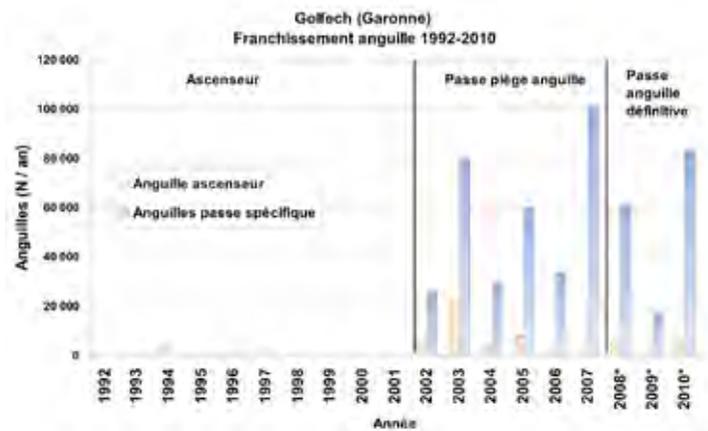
Le bassin tampon anti-retour a confirmé son utilité dans la mesure où 50 % des anguilles marquées engagées sur la passe amont redescendent (de 1 à 19 fois) dans le bassin tampon. La durée de stabulation dans le bassin est relativement brève, inférieure à 40 mn pour 86 % des individus, et aucune accumulation « anormale » n'a été observée.

La durée moyenne de franchissement de la passe amont est d'environ 2h30, 50 % des individus la franchissent en moins d'une heure et la durée maximale n'excède pas 24 heures. Le franchissement de la passe est essentiellement nocturne (pic entre 22h et 6h), comme sur la passe piège testée de 2003 à 2007. En revanche, il semble que la fraction de passage diurne soit plus importante sur la passe définitive (25 à 54 % selon les années) que sur la passe piège (20 % en 2007). Ceci pourrait résulter des aller-retours qu'effectuent les anguilles dans la passe.

Les allers-retours dans la passe pourraient résulter en partie des accumulations d'anguilles en sortie de passe dues à une appréhension à chuter à l'extrémité de la rampe. Une modification apportée au dispositif FishPass (rampe inclinée en prolongement de la rampe à brosse) a permis de diminuer de manière significative ces accumulations.

La prédation aviaire (hérons, mouettes...) s'est avérée très conséquente. Une protection grillagée des rampes et bacs de repos est indispensable.

Les passages annuels comptabilisés sur la passe définitive (61 300, 16 900 et 83 500 individus respectivement en 2008, 2009 et 2010) sont du même ordre de grandeur que ceux observés avec la passe-piège, avec des alternances d'années à faible et forte abondance (Figure), ce qui témoigne de l'efficacité du dispositif.



Franchissement de l'aménagement hydroélectrique EDF de Golfech (Garonne) par l'anguille de 1992 à 2010. 1992-2001 : ascenseur à poissons seul. 2002-2007 : adjonction d'une passe-piège spécifique à l'anguille avec transfert manuel. 2008-2010 : réalisation de la totalité de la passe spécifique à anguille.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Les passes de reptation sont utilisables sur des obstacles de hauteur importante. Pour leur assurer une efficacité optimale, il est conseillé d'installer, dans la partie basse de l'ouvrage, un bassin tampon anti-retour, d'optimiser les conditions de sortie des anguilles à l'amont de l'ouvrage et de protéger l'installation contre la prédation aviaire.

Partenaires : MIGADO (Laurent CARRY)

Pour en savoir plus :

Note technique : Test de la passe à anguille de l'usine hydroélectrique de Golfech (Garonne) (Rapport MIGADO/EDF à paraître)

Contacts : Laurent Carry (carry.migado@wanadoo.fr), François Travade (francois.travade@edf.fr)

Test du biomoniteur MIGROMAT® sur la rivière Shannon (Irlande)

Responsables scientifiques :
Michel Larinier - (Onema), François Travade - (EDF).

Biomoniteur MIGROMAT® installé sur la rivière Shannon - © F. Travade EDF



1. Contexte général de l'action

Une des solutions envisageable pour réduire les mortalités des anguilles argentées dans les turbines consiste à effectuer des manœuvres d'usine - arrêt ou réduction du débit turbiné, ouvertures de vannes... lors de la migration de dévalaison. La mise en oeuvre de cette solution nécessite de détecter les pics de migration de façon à minimiser les durées de manœuvres. L'utilisation d'un biomoniteur qui analyse les réactions d'anguilles maintenues en captivité pourrait être une voie de prévision des périodes de migration. Un tel dispositif, le MIGROMAT®, est proposé par le bureau d'études allemand IFAÖ (*Institut für Angewandte Ökologie*). Son efficacité reste à démontrer.

2. Objectifs de l'action

L'objectif de l'action était de valider *in situ* l'efficacité du MIGROMAT®. Le test a été conduit sur deux saisons de migrations 2008-2009 et 2009-2010 (d'octobre à février) sur la rivière Shannon (Irlande) par l'Université de Galway (NUIG).

3. Sites d'étude – Méthodologies

Le principe du biomoniteur MIGROMAT® repose sur le fait que des anguilles argentées maintenues en captivité dans des bacs, alimentés en eau du cours d'eau, présentent un regain d'activité (déplacements dans les bacs) lors des pics de dévalaison. Le MIGROMAT® se compose de deux bassins de 5 m³ contenant chacun une trentaine d'anguilles (voir photo) marquées par transpondeurs. Une analyse des mouvements d'anguilles est réalisée en temps réel par un ordinateur relié à l'aide de détecteur appropriés disposés dans le bassin. Lorsque l'activité des anguilles est considérée comme caractéristique d'un pic de dévalaison par le programme informatique, le dispositif envoie automatiquement par e-mail une alarme de prévision de dévalaison.

Le dispositif a été installé de septembre 2008 à mars 2010 à Killaloe (rivière Shannon) en amont d'une pêcherie comprenant 34 filets servant à une opération de capture-transport, dont 8 filets index manœuvrés quotidiennement.

Le protocole expérimental a consisté à comparer les alarmes générées par le biomoniteur aux pics de dévalaison mesurées par la pêcherie (filets index) et à quantifier la fraction de stock dévalant qui aurait échappée à des turbines arrêtées durant la nuit (18h-7h) lors des périodes d'alarmes. Pour ce faire, les échappements ont été simulés par trois modèles suivant l'heure à laquelle interviennent les alarmes : « modèle instantané » avec arrêt immédiat de turbines lors de l'alarme, « modèle 12h » avec arrêt des turbines à 18h sur une alarme survenant avant 12h, et « modèle 18h » avec arrêt des turbines à 18h sur une alarme survenant entre 12h et 18h.

Durant les deux saisons de migration, l'étude a été conduite sur une période continue de 60 jours au minimum.



MIGROMAT® sur le site de Killaloe (Irlande) © F. Travade EDF



Pêcherie de Killaloe (rivière Shannon – Irlande) © K. McCarthy NUIG

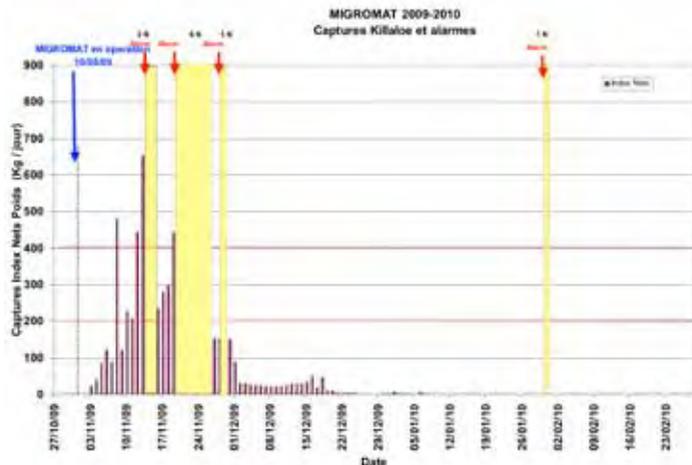
4. Résultats

Sur les deux années de suivi, le fonctionnement hydraulique (alimentation en eau) et électronique (analyse de l'activité des anguilles, transmission automatique des alarmes...) du MIGROMAT® s'est avéré très performant.

Les alarmes générées par le MIGROMAT® auraient permis (selon les modèles d'évaluation) l'échappement de 14 % à 21 % (2008) et de 18 % à 29 % (2009) du stock pendant une durée de 2,2 % à 4,4 % (2008) et de 5 % à 8 % (2009) du temps de la migration.

Il apparaît que l'efficacité limitée du biomonitor provient essentiellement d'une détection tardive du pic migratoire. En effet, les alarmes générées par le MIGROMAT® interviennent bien au cours de pics migratoires (Figure) mais ces alarmes sont envoyées alors que le pic migratoire est déjà en cours, parfois depuis plusieurs jours.

Les échappements d'anguilles qu'aurait généré le MIGROMAT® (de 14 % à 29 % du stock dévalant) s'il avait été utilisé comme pilote d'arrêt de turbines sont insuffisants par rapport aux objectifs d'échappement requis dans les plans de gestion anguilles, supérieurs à 40 % pour la totalité d'un axe migratoire.



Captures journalières d'anguilles argentée au piège de Killaloe (rivière Shannon – Irlande) en 2009-2010 (histogrammes) et alarmes générées par le MIGROMAT® (plages jaunes.)

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des prises d'eau de centrales hydroélectriques

Transfert technologique : En l'état actuel de son efficacité, les résultats obtenus ont amené l'Onema à conclure que le MIGROMAT®, ne peut pas faire l'objet d'un outil opérationnel de manœuvre des turbines agréé par l'administration en France.

Partenaires : Université de Galway (NUIG) : Kieran McCarthy

Pour en savoir plus :

Note technique : Final Report on the Operation of the MIGROMAT® at Killaloe, Ireland (2008-2010). Université de Galway.

Contacts : Kieran McCarthy (tk.mccarthy@nuigalway.ie), François Travade (francois.travade@edf.fr)

Test d'un dispositif de répulsion à infrasons au droit de deux ouvrages hydroélectriques sur le Gave de Pau

[Fiche 13]

Responsables scientifiques :

Philippe Baran (Onema), Frédérique Bau (Irstea),
Michel Larinier (Onema), François Travade (EDF).

Migromat - © D. Hauw - Onema



1. Contexte général de l'action

Afin de limiter les risques de dommages pour les anguilles argentées lors de leur passage au travers des turbines des centrales hydroélectriques, des solutions technologiques peuvent être mises en œuvre pour empêcher les poissons de pénétrer dans les prises d'eau et les guider vers un exutoire. Ces dispositifs sont constitués soit de barrières physiques (grilles à faible espacement de barreaux) soit de barrières comportementales utilisant l'effet d'un stimulus répulsif ou attractif pour le poisson (lumineux, électrique, visuel, sonore...). La société ProFish Technologies a développé un dispositif s'appuyant sur des répulseurs à infrasons déjà mis en œuvre sur des centrales nucléaires.

2. Objectifs de l'action

L'action avait pour objectif de tester l'aptitude des répulseurs à infrasons de la société ProFish Technologies à détourner les anguilles argentées en dévalaison des prises d'eau de centrales hydroélectriques et à les empêcher de ce fait de passer par les turbines.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Les tests du dispositif ont été conduits sur 2 centrales hydroélectriques du Gave de Pau choisies pour leur complémentarité : Biron avec implantation, en entrée du canal d'amenée, d'une barrière à 5 (campagne 2008-2009) et 8 répulseurs (2009-2010) et Baigts avec implantation de 3 répulseurs derrière un plan de grilles à 3 cm d'espacement inter-barreaux) (1 campagne en 2008-2009). 150 anguilles argentées équipées d'émetteurs ont été déversées en amont plus ou moins immédiat des ouvrages et suivies par télémétrie à partir d'un réseau de récepteurs installés au droit des ouvrages. Sur chacun des sites, la voie de passage des poissons et donc la fraction d'anguilles approchant et traversant la barrière sonore et franchissant l'obstacle par les turbines a pu être identifiée. L'efficacité des dispositifs a été évaluée en comparant cette fraction à celle obtenue lors des campagnes de suivis effectuées les années précédentes sur les mêmes sites, en intégrant notamment les conditions hydrologiques au travers du rapport entre débit déversé au barrage et débit total de la rivière.



Répulseur ProFish supporté par un flotteur dans le canal d'amenée de l'usine de Biron (Schéma © ProFish, photo © F. Travade)

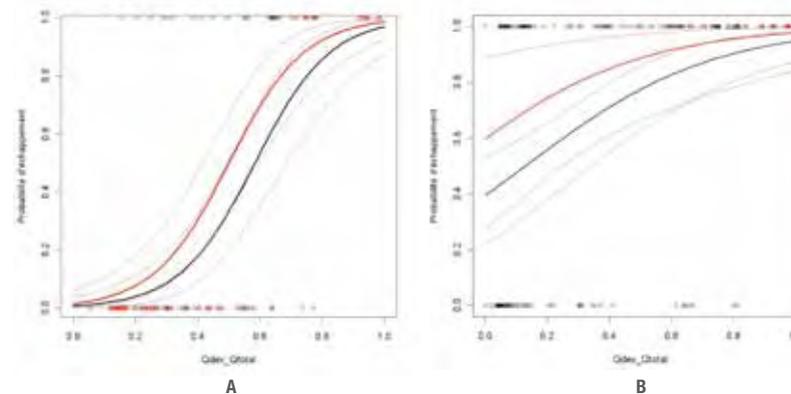
4. Résultats

Sur le plan du fonctionnement, le dispositif s'est avéré peu robuste, puisqu'au cours des 2 années, les arrêts et/ou les pannes des dispositifs ont nécessité 55 interventions sur le site. La majorité des arrêts ont été relativement brefs (quelques heures).

En matière d'efficacité, **sur les deux sites de Biron et Baigts**, respectivement 56 % et 7 % des anguilles ont franchi la barrière et dévalé par les turbines, les autres ayant empruntées les déversoirs (respectivement 41 % et 70 %), les passes à poissons (3 % à Biron) et les exutoires (23 % à Baigts). Une partie des poissons passe directement par les déversoirs sans se présenter devant la prise d'eau. Cet échappement ne peut être attribué aux répulseurs.

A Biron, près de 80 % des poissons venus au voisinage du répulseur sonore le franchissent et passent dans les turbines (79 % en 2008 et 78 % en 2009). A Baigts 15 % seulement passent par les turbines, mais sur ce site, l'échappement important par les déversoirs peut être attribué autant à l'effet répulsif des grilles de prise d'eau situées en amont du répulseur qu'au répulseur lui-même. La comparaison des probabilités d'échappement par les déversoirs sur les deux sites avec et sans répulseurs sonores en considérant les résultats obtenus lors des campagnes précédentes en absence de la barrière à infra-sons (Figure) montre que les barrières à infrasons n'ont pas eu d'effets significatifs sur les voies de franchissement des anguilles.

En conclusion, les barrières à infra-sons se sont avérées inaptes à empêcher le passage par les turbines que ce soit dans la configuration d'un site standard bien représentatif comme Biron ou dans celle d'un site plus atypique tel que Baigts.



Probabilités moyennes d'échappement des anguilles par les ouvrages évacuateurs et intervalles de confiance à 95 % (— sans répulseurs, - - - avec répulseurs), en fonction du rapport débit déversé au barrage ($Q_{\text{dévers}}$) sur débit total (Q_{total}) du cours d'eau à Biron (A) et pour des anguilles de 700 mm à Baigts (B).

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des prises d'eau de centrales hydroélectriques sur l'anguille en dévalaison

Transfert technologique : Les expérimentations amènent à conclure que le dispositif ne présente aucune efficacité significative pour éviter ou minimiser l'entraînement des anguilles en dévalaison dans les prises d'eau de centrales hydroélectriques.

Partenaires : CNR – EDF – Profish Technology – Société Topwatt

Pour en savoir plus :

F. BAU, J. LAFITTE, P. BARAN, M. LARINIER F. TRAVADE, E. DE OLIVEIRA, 2011. Test d'un dispositif de répulsion à infrasons au droit de deux ouvrages hydroélectriques sur la Gave de Pau. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 76p et annexes.

Contacts : Philippe Baran (philippe.baran@imft.fr ou philippe.baran@onema.fr),
François Travade (francois.travade@edf.fr)

Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Perte de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés et champs de vitesse à leur approche

Responsables scientifiques : Laurent David (Institut P²), Ludovic Chatellier (Institut P²), Dominique Courret (Onema), Michel Larinier (Onema).

Prise d'eau - © D. Courret



1. Contexte général de l'action

Les prises d'eau ichtyocompatibles définies comme les plans de grilles à faible espacement libre entre barreaux, associés à un ou plusieurs exutoires, constituent un type de solution pour éviter, ou du moins fortement limiter le passage par les turbines des anguilles argentées en dévalaison. En 2008, une étude a permis d'en définir les bases de conception et de dimensionnement à partir du retour d'expérience acquis en France comme à l'étranger (Courret et Larinier, 2008). Pour arrêter les anguilles et les empêcher de passer par les turbines, il est préconisé d'adopter un espacement libre entre barreaux de l'ordre de 1,5–2,0 cm afin de constituer une barrière physique, en respectant une vitesse normale au plan de grille, maximale de 50 cm/s pour ne pas induire de placage des poissons. Pour guider les poissons vers un exutoire, il est préconisé d'implanter :

- soit un plan de grille perpendiculaire à l'écoulement, fortement incliné par rapport à l'horizontale, avec un ou plusieurs exutoires selon la largeur de la prise d'eau positionnés au sommet ;
- soit un plan de grille vertical, orienté par rapport à la direction de l'écoulement, l'exutoire étant alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille.

Ces critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles constituent des modifications importantes par rapport à la conception conventionnelle et ont des répercussions sur les pertes de charge au passage des plans de grille et sur leur entretien (dégrillage).

2. Objectifs de l'action

L'action avait un triple objectif :

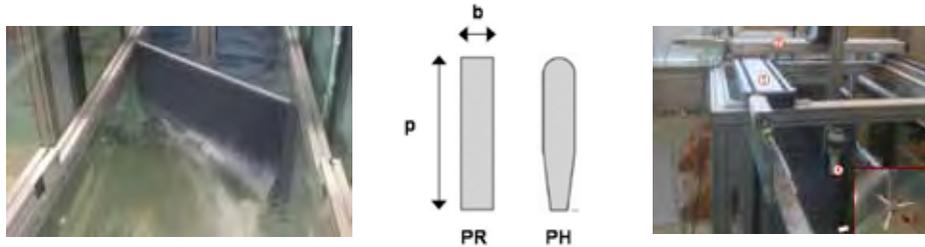
- caractériser les pertes de charge au passage des plans de grille à faible espacement libre entre barreaux dans des configurations ichtyocompatibles afin de valider ou d'adapter les formules existantes, et à défaut d'en proposer de nouvelles ;
- caractériser les vitesses d'écoulement à l'approche des plans de grille ichtyocompatibles afin de vérifier que les critères de conception préconisés se traduisent par les conditions hydrauliques recherchées pour les poissons dévalant, et le cas échéant de les affiner ;
- préciser les critères de positionnement et d'alimentation en débit des exutoires dans chaque configuration.

Les deux premiers objectifs ont été atteints ; l'étude se poursuit pour le troisième.

3. Sites d'étude – Méthodologies

L'étude a consisté en une approche expérimentale sur modèle réduit physique, tout d'abord avec une grille tractée au sein d'un bassin, puis dans une veine hydraulique construite spécifiquement, réalisée sur les sites du SP2MI et du CEAT de l'Institut P² de Poitiers. Les plans de grille ont été reproduits à l'échelle 1/2. 88 configurations ont été testées

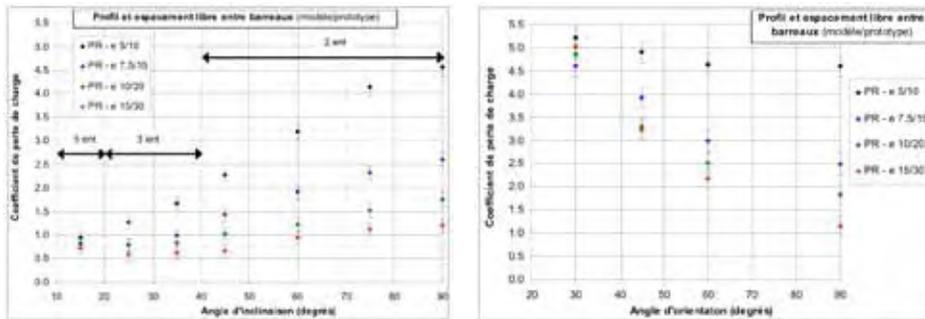
en combinant 11 dispositions de plans de grille (4 angles d'orientation α de 90° [perpendiculaire] à 30° et 7 angles d'inclinaison β de 90° [vertical] à 15°), 4 espacements libres entre barreaux (e de 10 à 30 mm) et 2 profils de barreau (rectangulaire PR et hydrodynamique PH). L'influence du colmatage partiel du plan de grille sur les pertes de charge et les vitesses d'écoulement a également été étudiée via l'ajout de plaque perforée. Les pertes de charge ont été mesurées à partir des différences de niveau d'eau amont/aval du plan de grille. Les vitesses d'écoulement ont été caractérisées à partir de profils le long des plans de grille par sonde ADV et mesures laser.



A gauche, un plan de grille orienté à 45° vu depuis l'aval dans la veine hydraulique du CEAT. Au centre, les 2 profils de barreaux testés. A droite, la sonde ADV 3D et son système de déplacement automatisé.

4. Résultats

Pertes de charges



Variation du coefficient de perte de charge selon l'inclinaison (à gauche) ou l'orientation (à droite) du plan de grille et l'espacement libre entre barreaux (profil de barreau rectangulaire PR). Les flèches matérialisent les gammes de nombre d'entretoises utilisées entre les barreaux.

La formule de Meusburger (2002), qui était la plus complète jusqu'à présent, ne s'avère pas adaptée aux configurations de plans de grilles ichtyocompatibles. De nouvelles formules de perte de charge ont donc été proposées. L'obstruction globale O du plan de grille est définie comme le rapport entre la surface occupée par tous les éléments de la grille (barreaux, entretoises, support) et la surface immergée de la grille. Pour les plans de grille fortement inclinés, il a été nécessaire de dissocier d'une part l'obstruction liée aux barreaux et autres éléments verticaux O_b rapportée à la surface immergée de la grille, et d'autre part l'obstruction effective liée aux entretoises et autres éléments transversaux O_{ent} rapportée à la section d'écoulement.

Loi de perte de charge ΔH pour les plans de grilles orientés par rapport à la direction de l'écoulement :

$$\Delta H = \frac{V^2}{2g} * \left[A * \left(\frac{O}{1-O} \right)^{1.6} * \left(1 + C * \left(\frac{90-\alpha}{90} \right)^{2.35} * \left(\frac{1-O}{O} \right)^3 \right) \right]$$

Avec V la vitesse débitante amont, A et C des coefficients fonction du profil de barreau valant respectivement 2.89 et 1.69 pour PR et 1.70 et 2.78 pour PH. Loi pour les plans de grille verticaux ($\beta = 90^\circ$) et orientés par rapport la direction de l'écoulement ($30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), applicable sur une gamme d'obstruction O de 0.35 à 0.6, pour un rapport largeur sur profondeur du barreau b/p voisin de 0.125, pour un rapport espacement libre sur largeur du barreau e/b compris entre 1 et 3.

Loi de perte de charge ΔH pour les plans de grilles inclinés par rapport à l'horizontale :

$$\Delta H = \frac{V^2}{2g} * \left[A * \left(\frac{O_b}{1-O_b} \right)^{1.65} * (\sin \beta)^2 + C * \left(\frac{O_{ent}}{1-O_{ent}} \right)^{0.77} \right]$$

Avec V la vitesse débitante amont, A un coefficient fonction du profil de barreau valant 3.85 pour PR et 2.10 pour PH, C un coefficient fonction de la forme des entretoises et autres éléments transversaux, assimilable à un coefficient de traînée (1.79 pour des entretoises cylindriques). Loi pour les plans de grille perpendiculaires à l'écoulement ($\alpha = 90^\circ$) et inclinés par rapport à l'horizontale ($15^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$), applicable sur une gamme d'obstruction globale O de 0.35 à 0.6.

Dans le cas des plans de grille perpendiculaires à l'écoulement, verticaux ou inclinés, l'intérêt du profil de barreau hydrodynamique s'avère un peu plus faible qu'attendu ; ce profil permet tout de même de réduire les pertes de charge d'un facteur de l'ordre de 1.7 (au lieu de 2.34) par rapport au profil de barreau rectangulaire. Dans le cas des plans de grille orientés, l'intérêt du profil hydrodynamique s'amoindrit d'autant plus que l'orientation est prononcée.

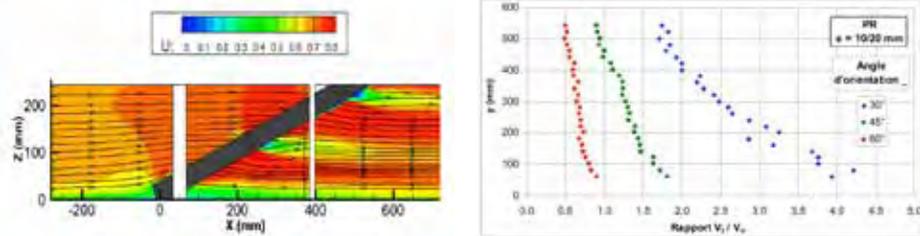
L'augmentation des pertes de charge du fait de colmatages partiels de la grille jusqu'à des taux de l'ordre de 60 % a été caractérisée. En première approche, l'influence du colmatage peut être appréhendée en additionnant le taux de colmatage de la grille à son taux d'obstruction.

Plusieurs point d'études complémentaires ont été identifiés vis-à-vis de la problématique des pertes de charge et seront traités dans la poursuite de l'étude.

Champs de vitesse

Le long des plans de grille inclinés, l'accélération des vitesses vers le sommet s'avère modérée. En sommet de grille, les vitesses tangentielles atteignent notamment des valeurs environ 20% supérieures aux valeurs théoriques obtenues par projection de la vitesse d'approche ($V \cos \beta$) ; cet ordre de grandeur peut être retenu comme vitesse d'entrée des exutoires. Vis-à-vis des risques de placage des poissons sur la grille, pour ne pas engendrer de vitesse normale de plus de 0.5 m/s, les vitesses à l'approche de plans de grille inclinés à 15°, 25°, 35° et 45° ne doivent pas dépasser environ 1.25, 0.83, 0.67 et 0.56 m/s respectivement. Vis-à-vis du guidage des poissons, le critère d'inclinaison d'un angle $\beta \leq 26^\circ$, visant à obtenir une vitesse tangentielle au moins 2 fois supérieure à la vitesse normale pour inciter les poissons à venir passer en surface, est confirmé.

Le long des plans de grille orientés, l'accélération des vitesses vers l'aval est prononcée. Les vitesses normales atteignent notamment à l'extrémité aval du plan de grille des valeurs de l'ordre de 0.8-0.95*V, 1.0-1.15*V et 1.05-1.15*V, pour respectivement une orientation à 30°, 45° et 60°. Vis-à-vis des risques de placage des poissons sur la grille, pour ne pas engendrer de vitesse normale de plus de 0.5 m/s, il faudrait que les vitesses d'approche ne dépassent pas environ 0.45-0.55 m/s selon l'orientation. L'acceptation de vitesses normales quelque peu supérieures sur une partie aval de la grille pourrait permettre d'adopter des vitesses d'approche V plus élevées. Pour la vitesse d'entrée des exutoires, on peut retenir des valeurs de l'ordre de 1.7*V, 1.15*V et 0.6*V pour les orientations à 30°, 45° et 60° respectivement. Vis-à-vis du guidage des poissons, le critère d'orientation d'un angle $\alpha \leq 45^\circ$, visant à obtenir une vitesse tangentielle supérieure ou égale à la vitesse normale, est confirmé.



A gauche, cartographie PIV de la vitesse longitudinale (en m/s) autour d'une grille inclinée à 25°. A droite, évolution du rapport entre les vitesses tangentielles et normales le long de plans de grille orientés, selon l'orientation.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des prises d'eau de centrales hydroélectriques

Transfert technologique : Conception des prises d'eau ichtyocompatibles ; évaluation des pertes de charge dans les configurations conventionnelles et ichtyocompatibles. On dispose aujourd'hui de formules de perte de charge adaptées aux plans de grille notamment pour ceux orientés ou inclinés à faible espacement de barreaux.

Partenaires : CNR – SHEM – EDF – France-Hydroélectricité – ADEME – MJ2 – HYDREO

Pour en savoir plus :

S. RAYNAL, L. CHATELLIER, L. DAVID, D. COURRET, M. LARINIER, 2011. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Perte de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés à faibles espacements libres entre barreaux et champs de vitesse à leur approche. Rapport Institut P' / Onema - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

Contacts : Laurent David (laurent.david@univ-poitiers.fr), Ludovic Chatellier (ludovic.chatellier@univ-poitiers.fr), Dominique Courret (dominique.courret@imft.fr ou dominique.courret@onema.fr)

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)

Responsables scientifiques : Michel Larinier (Onema), Thierry Lagarrigue (ECOGEA).

Dispositif complet de récupération en place, VLH en marche - © Ecogea



1. Contexte général de l'action

Le groupe turbogénérateur VLH possède des caractéristiques ichtyophiles liées à sa conception. Le 1^{er} prototype de VLH installé à Millau a fait l'objet de tests de dévalaison de smolts et d'anguilles argentées en 2008. Ces tests, dont les résultats sont très satisfaisants, ont permis de confirmer les facultés ichtyophiles des VLH. Ils ont également ouvert des perspectives d'amélioration. Sur la base de ces résultats, des modifications du contour hydraulique ont été introduites. Le manteau de roue a été modifié, adoptant une forme sphérique afin de diminuer le jeu en bout de pale. De nouveaux tests organisés sur la PCH de Frouard visaient à mesurer l'impact de ces modifications sur le caractère ichtyophile des VLH.

2. Objectifs de l'action

Une de ces nouvelles VLH « à manteau de roue sphérique » a été installée sur le site de Frouard (54) sur la Moselle, en février 2010 et a fait l'objet de tests complémentaires en 2011.

3. Sites d'étude – Méthodologies

La centrale de Frouard, implantée sur la Moselle à proximité de Nancy, est encadrée par les centrales d'Aingerey à l'amont et de Pompey à l'aval. Le Module de la Moselle à Frouard est d'environ 65 m³/s (63.2 m³/s à la station de la Banque Hydro à Toul, soit environ 10 km à l'amont de la centrale de Frouard, sur la période 1960 – 2010).

La centrale de Frouard est en fait constituée de 3 petites centrales indépendantes. La centrale «du moulin» comprend 2 turbines hélices de 10 m³/s chacune, d'une puissance unitaire de 200 kW. La centrale «de l'île» comprend une turbine Kaplan, simple réglage, de 30 m³/s, pour une puissance de 700 kW. Enfin, la centrale «de l'écluse» comprend la nouvelle machine VLH 4500 qui a servi aux essais.

Cette machine à manteau de roue sphérique est en fonctionnement depuis février 2010. Elle comporte huit pales et sa puissance électrique maximale, limitée par la puissance du contrat de vente de l'énergie, est de 400 kW. Elle débite 22 m³/s, sous une chute nette de 2,4 m.

A l'amont de la turbine, un dispositif avec un tube en PVC fixé sur le distributeur au niveau des directrices permet d'injecter des anguilles et, par conséquent, de les faire transiter dans la turbine (cf. Photo page suivante). A l'aval de la turbine, un cadre métallique positionné dans des rainures est équipé d'un filet en polyamide sans nœud au bout duquel un vivier immergé au 2/3 grâce à un ponton flottant permet de récupérer les anguilles (cf. Photo ci-dessus).



Vue du tube d'injection relié à la pièce métallique installée sur le distributeur de la VLH - © Ecogea

4. Résultats

Le taux de blessures léthales immédiates d'anguilles adultes (taille comprise entre 60 cm et 1 m) transitant par la nouvelle VLH à manteau de roue sphérique installée à Frouard, fonctionnant à pleine ouverture et à pleine puissance, est extrêmement faible, voire nul, et le taux de blessures non léthales à court terme (24 h à 48 h) est faible, puisque de l'ordre de 2 %.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des centrales hydroélectriques et mise en valeur des très basses chutes y compris dans le contexte de cours d'eau qualifiés «à grands migrants»

Transfert technologique : Solution technique adaptée aux ouvrages transversaux de basses chutes

Partenaires : Ecogea, Onema, Ademe, France hydroélectricité, Centrale hydroélectrique de Frouard, MJ2 Technologies, EDF

Pour en savoir plus :

Lagarrigue, Voegtle et Lascaux, 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. Rapport Ecogea.

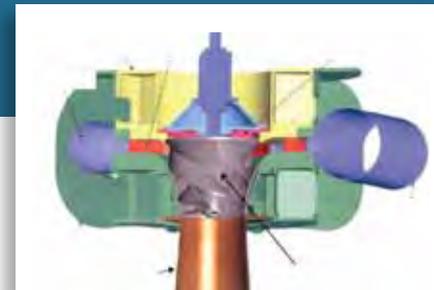
Lagarrigue, Voegtle et Lascaux, 2011. Test d'évaluation des dommages subis par les juvéniles de salmonidés et les anguilles argentées en dévalaison lors de leur transit à travers le groupe turbogénérateur VLH à manteau de roue sphérique installé sur la Moselle à Frouard (54). Rapport Ecogea.

Contacts : Thierry Lagarrigue (thierry.lagarrigue@ecogea.fr); Francis Maury (francis.maury.mj2@orange.fr); Marc Leclerc (marcthierry.leclerc@dbmail.com)

Contribution à la mise au point de la turbine « Fish Friendly » ALDEN

Responsable scientifique :
François Travade (EDF R&D)

Turbine « Fish Friendly » Alden. Vue en coupe. Source EPRI



1. Contexte général de l'action

Une des solutions pour minimiser les dommages sur les poissons en dévalaison lors de leur passage dans les turbines de centrales hydroélectriques est de disposer de turbines à faible taux de mortalité. Ce type de turbines dénommé « *Fish Friendly* » en Amérique du Nord (ichtyo-compatible en français) a fait l'objet, dans les années 90, d'un programme de développement aux États-Unis. Un nouveau type de turbine, dénommé « turbine Alden », proposé en 1995 par un consortium composé de *Alden Research Laboratory* et de *Concepts NREC*, comprend une roue à trois pales de forme hélicoïdale inspirée de certains modèles de « pompes à poissons ».

Les études, réalisées de 1995 à 2011, ont été pilotées par l'EPRI (*Electric Power Research Institute*) et financées par le *U.S. Department of Energy* (DOE) et divers producteurs d'électricité.

De 1995 à 2008, le programme a porté sur le design de la turbine (modélisation numérique) et sur des tests biologiques réalisés en laboratoire sur un prototype à l'échelle 1 :3.25.

De 2008 à 2011, le constructeur Voith Hydro a réalisé les études d'industrialisation de la turbine : optimisation du rendement énergétique avec conservation des caractéristiques « *Fish Friendly* ».

2. Objectifs de l'action

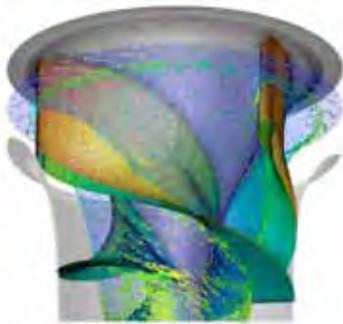
L'objectif de l'action a consisté à participer au co-financement de la phase d'industrialisation de la turbine Alden : contribution financière sur trois années (2008-2010) de EDF au programme piloté par l'EPRI.

3. Sites d'étude – Méthodologies

Les dommages subis par les poissons lors du passage dans les turbines hydroélectriques résultent de plusieurs facteurs : chocs sur les pales, coincement entre les pales et le manteau ou entre les pales et le moyeu de la roue, cisaillement de l'écoulement, gradients de vitesses et de pression et pression minimale absolue.

Dans son principe, la turbine Alden est dimensionnée pour éliminer ou limiter les effets de ces divers facteurs : limitation des risques de chocs en minimisant le nombre de pales (3), élimination des risques de coincement entre la roue, le manteau et le moyeu en supprimant les espacements (pales soudées sur le moyeu et sur le manteau qui tourne avec la roue), limitation des gradients de pression (gradient < 3500 kPa/sec) et maintien de la pression absolue dans la roue au dessus de 0,5 atmosphère.

Après le design de la roue, réalisé par modélisation numérique (Figure), des tests biologiques ont été réalisés au laboratoire d'hydraulique d'Alden sur un prototype à l'échelle 1 :3.25 (diamètre de 1,22 m, hauteur de chute de 12 et 24 m, vitesse de rotation de 240 t/mn) dans lequel ont été injectés 40 000 poissons (6 espèces) de tailles comprises entre 36 et 425 mm. La survie des poissons, extrapolée à une turbine échelle 1, a été évaluée à 97 % - 100 %. Pour l'anguille d'une longueur de 250 à 430 mm, le taux de survie était de 100 % sur le modèle. En revanche, il a été jugé difficile d'extrapoler la survie à des individus de taille représentative du stock dévalant (600 à 1000 mm).



Modélisation numérique de la turbine Alden. Source EPRI

4. Résultats

A la suite de ces résultats biologiques considérés comme satisfaisants, le design final de la turbine a été réalisé de 2008 à 2010 par le constructeur Voith Hydro avec un triple objectif : optimiser le rendement énergétique de la turbine, maintenir des caractéristiques « *fish friendly* » et minimiser les coûts de fabrication.

Les modélisations numériques et les tests sur modèle physique (échelle 1:8.7) ont conduit au design industriel de la turbine optimisée pour les caractéristiques suivantes : diamètre de la roue 3,7 m, débit 45 m³/s, hauteur de chute 28 m, vitesse de rotation 120 tr/mn, puissance 11MW. Le rendement de cette turbine est de 93,6 %.

La survie des poissons prédite serait de 98,4 % pour des poissons de 200 mm de longueur et voisine de 100 % pour des poissons de 100 mm de longueur.

Des tests biologiques *in situ* sont programmés par l'EPRI sur une turbine de taille similaire à celle optimisée par Voith Hydro. Les tests consisteront à mesurer la survie de poissons de diverses espèces et longueurs, injectés dans la turbine. La sélection de sites tests est prévue en 2011-2012, la construction d'une turbine en 2013 et les tests biologiques en 2014-2015.

5. Applications à la gestion opérationnelle

Domaine d'application : Limitation des impacts des centrales hydroélectriques

Transfert technologique : La fonctionnalité de la turbine Alden pour l'anguille ne pourra être précisée qu'après 2015, à l'issue des tests biologiques *in situ* réalisés sur des individus de taille représentative du stock dévalant (longueur de 600 à 1 000 mm). Pour des caractéristiques de chute et de débit équivalentes, la turbine Alden a un diamètre supérieur aux turbines existantes. Il ne sera donc pas possible de remplacer des turbines existantes par des turbines Alden sans modification très importante du génie civil existant. Cette turbine pourrait être utilisée pour la construction de nouvelles centrales, l'augmentation de la capacité de centrales existantes, le turbinage des débits réservés ou le turbinage d'exutoires de dévalaison. Son utilisation est théoriquement possible pour des hauteurs de chute comprises entre 6 m et 37 m et pour des débits compris entre 14 m³/s et 57 m³/s.

Partenaires : EPRI (Doug DIXON)

Pour en savoir plus :
<http://www.epriturbineworkshop.com/>

Contacts : Doug DIXON (ddixon@epri.com), François TRAVADE (francois.travade@edf.fr)

Glossaire et références

ALDEN : bureau d'étude spécialisé en dynamique des fluides et environnement (USA). Concepteur de la turbine ichtyocompatible du même nom.

AIC : *Akaike Index Criterion*. Outil statistique pour l'évaluation de la pertinence d'un modèle.

Amphihalin (migrateur) : espèce migratrice dont le cycle de vie alterne entre les milieux marins et les eaux douces.

Anguille argentée : dernière forme du cycle de vie de l'anguille européenne, sous laquelle elle entreprend la migration de dévalaison et le retour à la mer des Sargasses.

Anguille jaune : forme sous laquelle l'anguille européenne effectue l'essentiel de sa croissance et de la colonisation des milieux continentaux.

Banque hydro : banque de données hydrologiques nationale. Centralise les mesures de hauteur d'eau en provenance de 3 500 stations de mesure implantées sur les cours d'eau français.

Bulbe : type de turbine à rotor horizontal commune sur le parc hydroélectrique français, proche des turbines Kaplan.

Clapet hydraulique : dispositif anti-retour, permettant le passage de l'eau dans un sens et l'interdisant dans l'autre.

Civelle : forme juvénile de l'anguille européenne, qui amorce la montaison dans la zone estuarienne et la partie aval des bassins versants.

CNR : compagnie nationale du Rhône. Producteur d'hydroélectricité, partenaire du programme R&D «Anguilles-ouvrages».

Conductivité : aptitude d'un matériau ou d'un fluide à permettre le passage d'un courant électrique (S. m⁻¹). Inverse de la résistivité.

«Coup d'eau» : accroissement rapide du débit d'un cours d'eau.

Dévalaison : migration continentale au cours de laquelle les anguilles argentées regagnent l'embouchure des fleuves.

Débit classé (Q_x) : pour un cours d'eau donné à une station donnée, le débit moyen journalier est inférieur X jours sur 100 au débit classé Q_x. On utilise classiquement les débits classés Q75, Q90, Q95, Q97,5 ou Q99.

Débit d'équipement : pour un ouvrage hydroélectrique, débit transitant par les turbines en fonctionnement nominal.

EPRI : *Electric power research institute*. Institut de recherche à but non lucratif, regroupant scientifiques et industriels de la production d'électricité (USA).

Exutoire (à poissons) : ouverture étroite aménagée dans un barrage, en surface ou au fond du réservoir, autorisant le passage des poissons vers l'aval de l'ouvrage.

FHE : France Hydroélectricité. Syndicat de petits producteurs d'hydroélectricité, partenaire du programme R&D «Anguilles-ouvrages».

GLM : modèle linéaire généralisé. Méthode de traitement de données permettant de relier des variables réponse à des variables explicatives.

Guideau : type de filet de forme allongée, à section d'entrée rectangulaire, tendu derrière une embarcation ancrée au milieu d'un cours d'eau. Classiquement utilisé pour la pêche professionnelle des anguilles.

Ictyocompatible : se dit d'un équipement ou aménagement dont la conception limite les impacts sur les poissons. Ex : prise d'eau ichtyocompatible, turbine ichtyocompatible.

Ictyophile : voir «ichtyocompatible».

Institut P' : institut de recherche et d'ingénierie en matériaux, mécanique et énergétique pour les transports, l'énergie et l'environnement (Poitiers). Partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

Kaplan : type de turbine à hélices adaptée aux débits importants, très courante sur le parc hydroélectrique français.

Leptocéphale : larve d'anguille translucide, en forme de «feuille de saule», qui traverse l'océan Atlantique nord en nage portée pour rejoindre l'embouchure des fleuves européens.

Luminosité (indice de) : valeur sans unité, variant entre 0 et 1, qui quantifie l'éclairement nocturne total à partir des phases lunaires et de la nébulosité.

Logrami : Loire Grands Migrateurs. Association pour la gestion et la restauration des poissons migrateurs du bassin de la Loire, partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

LNHE : Laboratoire national d'hydraulique et environnement. Département d'EDF R&D, partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

MNHN : Muséum national d'histoire naturelle, partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

Migado : association pour la gestion et la restauration des poissons migrateurs du bassin de la Garonne et de la Dordogne, partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

Module (du débit) : moyenne des débits moyens annuels d'un cours d'eau, à une station donnée, sur une période de référence.

Montaison : migration des civelles et des anguilles jaunes vers l'amont des bassins versants.

Nébulosité (indice de) : valeur sans unité variant entre 0 et 8, qui quantifie le niveau de couverture nuageuse du ciel vu depuis une station donnée.

Passe à reptation : dispositif composé de rampes ascendantes, irriguées par un faible débit d'eau, permettant la remontée des anguillettes à l'amont des barrages. Les rampes sont équipées de substrats de reptation : on distingue des «passes à brosses» ou des «passes à plots».

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

Pibale : voir «civelle».

Portes à flots : type d'ouvrages installés sur les canaux ou les cours d'eau dans la zone soumise à marée, composé de deux portes verticales, souvent associés à une écluse implantée en amont. Utilisés pour réguler les entrées d'eau salée dans les terres.

ROE : référentiel national des obstacles à l'écoulement. Banque de données développée par l'Onema, qui recense à ce jour plus de 60 000 obstacles à l'écoulement des cours d'eau (barrages, écluses seuils, moulins...), leur caractéristiques géométriques et leurs fonctionnalités, sur l'ensemble du territoire français. Disponible sur www.eaufrance.fr

Résistivité : inverse de la conductivité (voir ci-dessus).

SAGE : schéma d'aménagement et de gestion des eaux. Document de planification de la gestion de l'eau, défini à l'échelle d'un bassin versant ou d'un aquifère.

SDAGE : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux. Document de planification pour la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, défini à l'échelle de chaque grand bassin hydrographique français. Sert de cadre général pour l'élaboration des SAGE.

Transpondeur : émetteur automatique à radiofréquences, permettant le suivi de la position d'un objet mobile. Utilisé dans le cadre du programme R&D pour suivre les déplacements d'anguilles marquées (voir RFID).

RFID : *Radio Frequency Identification*. Technologie permettant de récupérer des données à distance au moyen d'antennes réceptrices, captant les signaux émis par des «puces RFID», ou «transpondeurs RFID».

SHEM : Société hydroélectrique du Midi, groupe GDF Suez. Producteur d'hydroélectricité, partenaire du programme R&D «Anguilles-Ouvrages».

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature.

VIE : type d'élastomère coloré, utilisé dans le cadre du programme R&D pour des opérations de marquage-recapture d'anguilles.

VLH : *Very low head*. Turbine ichtyocompatible adaptée aux très basses chutes. Développée par MJ2 Technologies et testée dans le cadre du programme R&D.

ZAP : zone d'action prioritaire, définie sur le territoire français dans le cadre du plan de gestion de l'anguille. Comprend 1555 ouvrages identifiés, dont 233 sont à usage hydroélectrique. Tous devront faire l'objet d'un diagnostic, et au besoin d'adaptations, pour devenir franchissables sans dommage, dans les deux sens, d'ici 2015.

Zone tidale : partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées. Synonyme : estran.

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.

BAU F., GOMES P., BORDES N., LARINIER M., TRAVADE F., DE OLIVEIRA E., 2008. Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le Gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2008). Rapport GHAAPE/EDF – RA08.06, N°H-P76-2008-04291-FR, 88p et annexes.

BAU F., GOMES P., BARAN P., LARINIER M., TRAVADE F., DE OLIVEIRA E., FREY A., MENNESSIER JM., 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, 103p et annexes.

BAU F., GOMES P., LAFITTE J., 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, 99p et annexes.

BAU F., LAFITTE J., BARAN P., LARINIER M., TRAVADE F., DE OLIVEIRA E., 2011. Test d'un dispositif de répulsion à infrasons au droit de deux ouvrages hydroélectriques sur le Gave de Pau. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 76p et annexes.

BAU F., GOMES P., BARAN P., DROUINEAU H., LARINIER M., TRAVADE F., DE OLIVEIRA E., 2012. Migration de dévalaison et franchissement d'aménagements hydroélectriques en série: synthèse des 3 années d'étude sur le Gave de Pau. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

COURRET D., M. LARINIER M., 2008. Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. RAPPORT GHAAPE RA.08.04

DEKKER W. 2000. The fractal geometry of the European eel stock. ICES Journal of Marine Science 57:109-121.

GOMES P., LARINIER M., 2008. Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. Rapport Onema - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 38p et annexes.

IMBERT H., BEAULATON L., RIGAUD C., and ELIE P. 2007. Evaluation of visible implant elastomer as a method for tagging small European eel. Journal of Fish Biology, 71(5) : 1546–1554.

LAMARQUE M., RIGAUD C., ALRIC A., BARAN P., 2012. Evaluation du comportement des civelles au droit d'un ouvrage à la mer et test de la modalité de gestion hivernal. Rapport Onema/Irstea - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

LAURONCE V., PRONIER A., ARQUE A., 2011. Actions pour la sauvegarde de l'anguille européenne sur le bassin Gironde Garonne Dordogne. MIGADO 21R-11-RT. 239 pp.

MATHUR, D., HEISEY P.G., EUSTON E.T., SKALSKI J.R., and S. HAYS. 1996. Turbine passage survival estimation for Chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. Can. Jour. Fish. Aquat. Sci. 53:542-549.

MEUSBURGER H, 2002. Perte de charge au niveau des grilles de prise d'eau des centrales hydroélectriques. Thèse de l'école polytechnique fédérale de Zurich. DISS. ETH n°14891.

RAYNAL S., CHATELLIER L., DAVID L., COURRET D., LARINIER M., 2011. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Perte de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés à faibles espacements libres entre barreaux et champs de vitesse à leur approche. Rapport Institut P' / Onema - Programme R&D Anguilles/Ouvrage.

RIGAUD C., BARAN P., DROUINEAU H., ROQUEPLO C., LAMARQUE E., FABRE R., ALRIC A., LAHARANNE A., ROUET M., Der MIKAELIAN S., 2012. Marquage-recapture et évaluation de l'efficacité d'un dispositif de franchissement sur un ouvrage estuarien ou proche de la limite de marée. Rapport Pôle Eco-hydraulique – Programme R&D Anguilles/Ouvrages.

TRAVADE F., LARINIER M., SUBRA S., GOMES P., DE-OLIVEIRA E., 2009. Franchissement par l'anguille argentée en dévalaison de l'aménagement hydroélectrique de Baigts-de-Béarn (64). Influence des débits et de la taille des anguilles sur le comportement de dévalaison et fonctionnalité des exutoires. Rapport Onema/EDF - Programme R&D Anguilles/Ouvrage, 57p et annexes.

TRAVADE F., LARINIER M., GOMES P., SUBRA S., DE OLIVEIRA E., 2010. Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst., 398.

VOEGTLE B., LARINIER M., 2008. Définition d'une stratégie de restauration de l'axe de migration pour l'anguille. Cours d'eau du Gave de Pau. Rapport ECOGEA/MIDIVAL/ Onema- Programme R&D Anguilles/Ouvrage,

La plupart des rapports du programme R&D Anguilles-Ouvrages sont disponibles sur le site de l'Onema (rubrique Publications) et sur le portail national des documents techniques sur l'eau (www.documentation.eaufrance.fr).

**La collection « Les rencontres-synthèses »,
destinée à un public technique
ou intéressé, présente les principaux résultats
de séminaires organisés, ou co-organisés, par l'Onema.**

*Changement climatique :
impacts sur les milieux aquatiques
et conséquences pour la gestion (février et août 2010)*

*Les mésocosmes :
des outils pour les gestionnaires
de la qualité des milieux aquatiques ? (mars 2011)*

*Quel(s) rôle(s) pour les instruments économique
dans la gestion des ressources en eau en Europe ?
Enjeux politiques et questions de recherche (juin 2011)*

*Captages d'eau potable et pollutions diffuses :
quelles réponses opérationnelles à l'heure
des aires d'alimentation de captage «grenelle» ? (août 2011)*

*Mise en oeuvre de la directive cadre sur l'eau.
Quand les services écosystémiques entrent en jeu (septembre 2012)*

Rédaction

Philippe Baran (Onema) et Laurent Basilico (journaliste)
en collaboration avec Michel Larinier (Onema),
Christian Rigaud (Irstea)
et François Travade (EDF-LNHE)

Édition

Véronique Barre (Onema/Dast)

Remerciements

A. Acou, F. Bau, L. Chatellier, D. Courret,
L. David, H. Drouineau, Ph. Dupont, P. Gomez,
D. Hauw, T. Lagarrigue, M. Lamarque,
L. Lissade-Bonnet, K. McCarthy, E. de Oliviera,
F. Pressiat, S. Raynal, C. Roussel,
ainsi que les membres du comité de pilotage.

ISBN : 979-10-91047-09-8

Création graphique : Inzemoon (06 75 24 19 30)
Réalisation : Bluelife (09 66 82 33 55)

Achévé d'imprimer en novembre 2012
Sur papier issu de forêts gérées durablement par :
IME – Imprimerie Moderne de l'Est
3, rue de l'industrie – B.P. 32017
25112 BAUME-LES-DAMES CEDEX

IMPRIMÉ EN FRANCE



