

VERS UNE PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ PLUS RESPECTUEUSE DU MILIEU AQUATIQUE ET DE SA FAUNE

par Jean Claude Philippart et Damien Sonny

Université de Liège, Faculté des Sciences,
Laboratoire de Démographie des Poissons, Hydroécologie et Aquaculture (LDPHA)
Institut Zoologique, 22 quai Van Beneden B-4020 Liège
Station d'Aquaculture, 10 chemin de la Justice B-4500 Tihange
Tél 085 27 41 55-57 - Fax 085 23 05 92
courriel : jphilippart@ulg.ac.be

Résumé

La génération d'hydroélectricité bénéficie actuellement d'un grand intérêt parce que considérée comme une activité non polluante en terme de production de déchets divers. Il s'avère toutefois que cette forme de production d'énergie peut avoir des effets mécaniques dévastateurs sur la faune aquatique et spécialement sur les poissons. Cet article propose une synthèse des différents types d'impacts associés au fonctionnement d'une centrale hydroélectrique installée sur un cours d'eau. Nous envisageons successivement les problèmes d'obstacle à la migration des poissons, les perturbations hydroécologiques des milieux, la mortalité directe des poissons par passage dans les turbines et l'influence du mode de fonctionnement des centrales. Pour chacun de ces aspects, nous examinons les solutions technologiques les plus récentes pour tenter de minimiser les impacts.

1. INTRODUCTION

Dans le prolongement des Conférences de Rio et de Kyoto sur la Biodiversité, le Développement Durable et l'Effet de serre, les Etats et spécialement l'Europe, se sont engagés à réduire l'émission des gaz à effet de serre, principalement le CO₂, et à développer l'utilisation des formes d'énergie renouvelables telles que la biomasse, la géothermie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie hydroélectrique.

En Belgique, la production d'hydroélectricité bénéficie actuellement d'un intérêt particulier dans la mesure où il serait question d'aménager ou de réhabiliter, pour la production d'électricité, de nombreux sites de barrages et d'anciens moulins. Par ailleurs, cette forme de production d'électricité par micro-centrale va bénéficier d'aides économiques (vente du courant par les particuliers à un prix intéressant, subsidiations, facilitation de l'octroi des autorisations de bâtir-exploiter, etc.) tandis que la construction et l'installation des mini-turbines apparaît comme un marché nouveau pour certaines sociétés spécialisées dans le domaine et disposant déjà parfois d'installations de démonstration. En outre, les grands producteurs d'électricité publics et privés sont aussi tenus d'accroître leur part de production d'électricité au moyen des sources alternatives aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire et sont amenées à investir dans l'hydroélectricité, en prolongement d'activités existantes, en l'occurrence les 6 centrales SPE sur la Meuse et les centrales Electrabel de Lorcé/Heide Goreux sur l'Amblève, de Bütgenbach et Bévercé/Robertville sur la Warche, du barrage de la Vierre qui toutes ensemble représentent une puissance installée d'environ 100 MW (PETITJEAN, 1996).

Le principal argument en faveur de la production d'hydroélectricité est son caractère écologique non polluant au sens où elle n'engendre aucun rejet : ni CO₂ et autres gaz, ni produits radioactifs, ni grands volumes d'eau de refroidissement, ni biocides utilisés dans l'entretien des circuits de refroidissement. Dans l'esprit de tous, producteurs, responsables politiques et administratifs, consommateurs, opinion publique et, même, mouvements et associations de protection de l'environnement, la "houille blanche" apparaît comme de l'"énergie verte" qui est d'autant mieux considérée qu'elle découle de l'utilisation d'une ressource naturelle locale, l'eau. Une analyse globale du problème révèle toutefois que l'hydroélectricité n'est pas aussi "verte" qu'on le proclame, dans le sens où la production de cette forme d'énergie, certes très propre en matière de rejets divers, entraîne néanmoins de multiples perturbations des écosystèmes aquatiques concernés et exerce un effet qui peut être dévastateur sur certaines ressources aquatiques vivantes et spécialement sur les poissons.

Cette communication présente succinctement les différentes formes d'impact de la production d'hydroélectricité sur les écosystèmes aquatiques dans le contexte hydrographique belge et examine les différents moyens disponibles, en développement ou à développer pour réduire et supprimer les impacts environnementaux majeurs de cette forme de production d'énergie renouvelable. Une attention particulière est accordée à l'évocation des efforts de recherche/développement faits actuellement en Amérique du Nord pour mettre au point un nouveau modèle de turbine "amie des poissons" (CADA, 1998).

2. INVENTAIRES DES INCIDENCES ET DES SOLUTIONS TECHNIQUES

2.1. EFFETS LIÉS À LA PRÉSENCE D'UN BARRAGE FORMANT UN OBSTACLE PHYSIQUE

La production d'hydroélectricité nécessite la présence d'un barrage qui, comme tout barrage d'une certaine hauteur, constitue une perturbation majeure de la continuité fluviale, comme obstacle à la libre circulation des poissons à la remontée (tableau I). Ce blocage par les barrages (pas seulement hydroélectriques) des migrations des poissons contribue à l'appauvrissement de la productivité piscicole de nombreuses parties de bassins hydrographiques en amont des obstacles et, dans certains cas, menace l'existence même des populations des espèces migratrices obligatoires, spécialement le saumon atlantique et l'anguille. C'est pourquoi, le rétablissement de la libre circulation des poissons migrateurs dans les fleuves et rivières représente un volet important des actions de restauration de la qualité écologique des milieux aquatiques à organiser dans le cadre de la Directive cadre sur l'eau en Union européenne. Pour ce qui concerne la Belgique, est actuellement d'application une Décision Benelux M(96)5 relative à la libre circulation des poissons dans les réseaux hydrographiques Benelux. En rapport avec cette décision, les Régions flamande et wallonne ont entrepris un inventaire détaillé des obstacles à la libre circulation des poissons dans un large éventail de cours d'eau et ont élaboré des programmes de construction prioritaire d'ouvrages de franchissement. Plusieurs barrages visés par ces programmes sont équipés de micro-centrales hydroélectriques ou pourraient l'être à l'avenir.

Dans ce contexte, tout nouveau ou ancien barrage à vocation hydroélectrique devra être équipé d'un ou plusieurs ouvrages de franchissement conçus selon les derniers développements de la technologie dans ce domaine (voir LARINIER, 1983; LARINIER *et al.*, 1994; LARINIER et TRAVADE 1999; JUNGWIRTH *et al.*, 1998) et adaptés aux conditions hydrauliques particulières qui caractérisent un site d'usine hydroélectrique. Un ouvrage de franchissement (échelle à poissons) aménagé à la base des turbines dans le canal de fuite de celles-ci peut voir son efficacité réduite du fait de la forte attraction des poissons par le courant d'eau turbiné. Cela entraîne la nécessité d'installer un dispositif de captage des poissons juste à la sortie des turbines ou de créer une attraction hydraulique très forte à l'entrée de l'échelle à poissons par accroissement du débit de l'échelle (comme c'est le cas aux nouvelles échelles à salmonidés des barrages mosans de Lixhe et de Monsin) ou par une autre technique (relevage d'eau par pompe à grand débit). Il faut signaler que la construction d'une centrale hydroélectrique au niveau d'un barrage préexistant peut rendre inopérante le ou les ouvrages de franchissement aménagés à l'origine sur l'obstacle. Ainsi, au moment de sa construction, le barrage d'Amspin-Neuville était équipé d'une échelle à poissons Denil bien positionnée dans la berge en rive gauche mais après la construction d'une centrale hydroélectrique en 1965, cette échelle s'est retrouvée dans un mauvaise position, avec une entrée aval tournée vers la zone des déver-

soirs et sans ouverture du côté du canal de fuite des turbines très attractif pour les poissons (figure 1). Il en a résulté une diminution des remontées de poissons de 85 % entre avant (1963) et après (1966) les travaux. Une remédiation est sur le point d'être apportée à cette situation par le MET-Région wallonne dans le cadre de sa contribution au programme "Meuse Saumon 2000" (PHILIPPART *et al.*, 1994).

2.2. EFFETS LIÉS À LA DÉRIVATION DE L'EAU DU COURS PRINCIPAL VERS LES TURBINES

Dans la majorité des cas de production de micro-hydroélectricité, le prélèvement d'eau pour le turbinage se fait par un canal d'amenée qui court-circuite le cours principal sur une distance plus ou moins longue. Il en résulte une diminution plus ou moins forte du débit dans l'ancien cours court-circuité, avec comme conséquence une perte de superficie d'habitat aquatique pour les poissons et les invertébrés benthiques leur servant de nourriture, pouvant conduire à des fortes diminutions des populations en place, surtout dans les petits cours d'eau (ALMODOVAR & NICOLA, 1999). Ce type d'impact peut être diminué par la fixation d'un débit réservé ou d'un débit plancher dans le bras de rivière court-circuité, en tenant compte des exigences particulières des espèces de poissons présentes. Il est donc important de bien connaître à la fois l'hydrologie de la rivière et la biologie des espèces concernées pour définir le débit réservé (SOUCHON *et al.*, 1998). Une disposition courante, notamment en France, est de fixer la valeur du débit réservé à 1/10^e du débit moyen annuel ou module.

Les modalités de répartition du débit entre le canal d'amenée des turbines et le cours principal ont aussi une influence majeure sur la franchissabilité de l'obstacle physique constitué par le complexe de production hydroélectrique. En période de bas et de moyen débit, quand une proportion élevée de celui-ci est dérivé vers les turbines, on enregistre une diminution de l'attractivité hydraulique du cours principal pour les poissons migrateurs, ce qui réduit les possibilités de franchissement du barrage-déversoir peu élevé ou par une échelle à poissons. Comme les poissons en remontée sont attirés hydrauliquement au pied des turbines, il est indispensable d'aménager une échelle à poissons très performante à ce niveau. En période de haut débit, l'attractivité hydraulique se répartit entre le canal de fuite de la centrale et le cours principal avec parfois prépondérance de l'attractivité dans celui-ci, une situation qui nécessite l'installation de deux échelles à poissons, une dans le canal de fuite des turbines et une au niveau du déversoir du cours originel. Pour les petites micro-centrales installées sur des cours d'eau à faible débit, on peut parfois faire l'économie de l'aménagement de deux passes à poissons en mettant en place à la sortie du canal de fuite des turbines un dispositif (par exemple une barrière électrique) de guidage des poissons vers le bras du déversoir et son ouvrage de franchissement. Pour étudier de tels problèmes, on dispose aujourd'hui d'un outil très performant, la télémétrie aquatique (BARAS et PHILIPPART, 1996) qui consiste à équiper les poissons avec un émetteur radio et

Type 1. Espèces qui vivent en mer et viennent se reproduire en eau douce (= migrateurs amphibiotiques anadromes) et dont les jeunes redescendent en mer ainsi que parfois les adultes survivants après la reproduction. C'est le cas du saumon atlantique et de la truite de mer ainsi que de la lamproie fluviatile, de la lamproie marine, de l'aloise finte, de la grande alose et du corégone oxyrhinque, espèces aujourd'hui disparues de la Meuse belge mais à nouveau présentes dans la Meuse néerlandaise.

Type 2. Espèces qui remontent les fleuves sous la forme de jeunes qui colonisent tout le réseau hydrographique (= migrateurs amphibiotiques catadromes) et dont les adultes redescendent vers la mer pour s'y reproduire. C'est essentiellement le cas de l'anguille.

Type 3. Espèces 100 % d'eau douce qui remontent les cours d'eau et les affluents à la recherche d'habitats de reproduction particuliers indispensables pour le dépôt des œufs.

- Recherche de bancs de gravier bien percolés et oxygénés chez les espèces d'eau vive (espèces rhéophiles) et reproductrices lithophiles (ponte sur ou dans le gravier) telles que la truite (commune) de rivière et l'ombre commun parmi les salmonidés et le barbeau fluviatile et, dans une certaine mesure, le hotu, parmi les cyprinidés d'eau vive.
- Recherche de plages de végétation chez certaines espèces d'eau lente et reproductrices phytophiles (ponte d'œufs collants sur les plantes) telles que le brochet au printemps et la carpe et la tanche en été.

Type 4. La plupart des autres espèces 100 % d'eau douce qui ont aussi naturellement tendance à migrer vers l'amont au moment de la reproduction mais sans que cela soit une condition impérative au succès de la reproduction car il existe généralement des frayères dans la zone de résidence. C'est le cas des espèces ubiquistes assez peu exigeantes pour le substrat de ponte telles que le gardon, les brèmes commune et bordelière et la perche fluviatile. Les espèces de type 3 et 4 montrent également des profils de mobilité vers l'aval des cours d'eau : en période de post-reproduction pour les géniteurs; au cours de l'été et de l'automne pour les jeunes alevins de moins de un an (0+).

Tableau 1 – Grands types de comportements migrateurs chez les poissons du bassin de la Meuse.

à étudier leur mobilité dans les axes fluviaux et leur comportement en aval des obstacles avant et après aménagement (CHANSEAU *et al.*, 1999; OVIDIO et PHILIPPART, 2002).

2.3. ENTRAINEMENT DES POISSONS VERS LES GRILLES DE LA PRISE D'EAU DES TURBINES

Le flux d'eau dérivé vers des turbines hydroélectriques transporte des poissons qui sont en dévalaison naturelle pour diverses raisons évoquées dans le tableau 1. Comme dans le cas des prises d'eau de refroidissement en rivière, le risque pour ces poissons est d'être incapables d'éviter l'aspiration et le passage forcé entre les barreaux de la grille de protection de la prise d'eau puis dans les turbines où ils peuvent être plus ou moins gravement blessés ou tués comme l'analyse en détail le point 2.4.

Pour réduire l'entraînement des poissons dans les turbines, on doit agir simultanément à deux niveaux : i) empêcher que le plus grand nombre possible de poissons atteignent la zone critique des turbines en installant une grille à faible espacement de barreaux verticaux ou à fines mailles rectangulaires, en diminuant la vitesse du courant à l'approche de la grille et en installant des dispositifs de répulsion-guidage mécaniques, hydrodynamiques, lumineux ou acoustiques et ii) laisser aux poissons repoussés par la grille une possibilité d'échappement par un exutoire latéral.

a) Protection de la prise d'eau par une grille à barreaux peu espacés

On connaît relativement bien l'écartement entre les barreaux d'une grille de prise d'eau pour empêcher le passage de quelques espèces de poissons à différentes tailles. L'espacement maximum recommandé entre les barreaux verticaux d'une grille est de 1,2-1,5 cm pour les juvéniles (smolts) du saumon et de la truite commune (Solomon, 1992), de 2,5 cm pour les anguilles argentées (d'après des études en France; Durif, com. pers.), de 3,5 et 4,2 cm respectivement pour les truites de mer et les saumons adultes en Ecosse (Solomon, 1992). Dans les cours d'eau où l'on vise la protection des jeunes salmonidés, s'impose l'installation de grilles à barreaux très rapprochés, ce qui crée de fortes contraintes à l'écoulement de l'eau et nécessite l'augmentation de la surface des grilles de filtration (par ex. avec des systèmes en V). Dans les fleuves (Meuse) et les grandes rivières (Ourthe), une part importante des poissons entraînés par les prises d'eau sont des juvéniles de cyprinidés et de percidés de moins de 10 cm qui de toute manière passeront à travers une grille à barreaux espacés de 1-1,5 cm. Sauf dans le cas de prises d'eau à très faible débit, il est difficile, en pratique, de protéger ces petits poissons par une méthode mécanique. Mais il existe en Allemagne, Rhénanie-Westphalie, des propositions d'utilisation de grilles à barreaux espacés de 0,5-1,0 cm (MULNV, 2001).

b) Aménagement d'un exutoire latéral au niveau de la grille de prise d'eau

Pour les salmonidés comme les saumons et les truites, la technologie des passes de dévalaison est relativement bien connue (EPRI, 1986, 1994; LARINIER et TRAVADE, 1999). En France, ces passes consistent en un pertuis de 0,5 à 1 m placé à côté de la grille de prise d'eau et alimenté en permanence avec un débit de minimum 0,5 m³/s par mètre de largeur. L'efficacité d'un tel exutoire peut être amélioré en créant, au moyen de déflecteurs judicieusement positionnés, un courant d'eau tangentiel au plan de la grille de prise d'eau, de telle sorte que les poissons soient hydrauliquement portés vers l'exutoire latéral. Cet effet peut encore être accru en plaçant la grille de prise d'eau non pas perpendiculairement à l'écoulement dans le canal d'amenée mais obliquement. De bons résultats ont aussi été obtenus en plaçant au-dessus de l'entrée de la passe à dévalaison un éclairage approprié qui attire les poissons (lampe à vapeur

de mercure pour les saumoneaux; LARINIER et BOYER-BERNARD, 1991). Il faut signaler qu'une passe expérimentale de dévalaison pour les saumoneaux de la Meuse (PRIGNON & MICHA, 1995) est actuellement en cours d'évaluation à la centrale hydroélectrique de Lixhe.

Chez les anguilles, qui tendent à rester sur le fond lors de leur migration nocturne de descente, on recommande d'aménager des passes de dévalaison en profondeur. Dans beaucoup de rivières peuplées à la fois d'anguilles et de salmonidés, il faudrait idéalement installer deux types de passes à dévalaison. Une remontée forcée des anguilles à proximité d'un exutoire de surface à salmonidés semble pouvoir être obtenue en inclinant à 45 °C la grille de protection de la prise d'eau (Larinier com. personnelle) mais cela nécessite un complet réajustement de toute l'infrastructure de dégrillage (figure 2). Le guidage des anguilles vers un exutoire latéral peut aussi être obtenu au moyen de dispositifs répulsifs basés sur l'utilisation de la

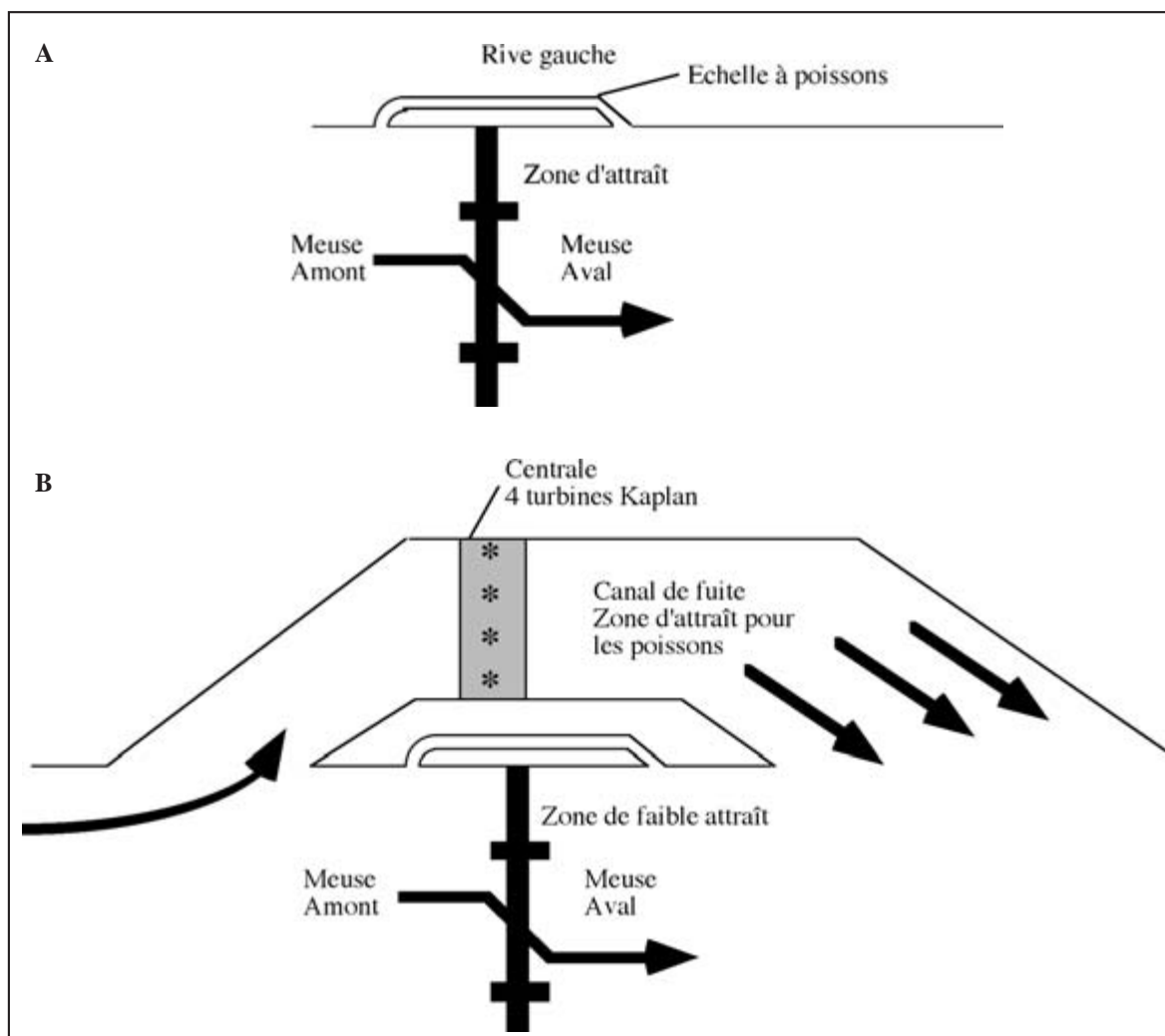


Figure 1 – A) Position de l'échelle à poissons située dans la rive gauche de la Meuse à la hauteur du barrage d'Ampsin-Neuville, avant la construction de la centrale hydroélectrique (1965). B) Position de la même échelle à poissons après construction de la centrale hydroélectrique. Le débit de fuite des turbines est une zone d'attrait pour les poissons, contrairement à la zone des déversoirs, souvent fermés en bas débit.

lumière (HADDERINGH *et al.*, 1992), comme ceux expérimentés au barrage de Linne sur la Meuse néerlandaise (HADDERINGH et BRUIJT, 2002) ou d'infrasons (SAND *et al.*, 2000).

2.4. EFFETS LIÉS AU PASSAGE DE L'EAU DANS LES TURBINES

2.4.1. Importance et cause des dommages causés aux poissons

Les dommages physiques occasionnés aux poissons lors de leur passage à travers les turbines hydroélectriques sont des sources majeures de mortalité pour beaucoup d'espèces migratrices de poissons d'eau douce. C'est particulièrement le cas chez l'anguille adulte (argentée) en route vers sa zone de reproduction en mer. La mortalité de l'anguille liée au passage dans une turbine Kaplan (4,2m de diamètre pour 83,4 rpm) sur le Neckar (Allemagne) a été estimée à 50% de la population dévalante (Berg, 1986). A la centrale de Linne (4 turbines Kaplan de 4 m de diamètre, 88 rpm) sur la Meuse hollandaise, le pourcentage d'anguilles mortellement blessées a été estimé à 11% en moyenne annuelle (22,8% pour les anguilles argentées en automne) (Hadderingh & Bakker, 1998). Sur le site de la centrale de Haandrik (1 turbine Kaplan de 2m de diamètre, 150 rpm) sur la Vecht hollandaise, les mêmes auteurs ont observé un taux de blessures mortelles de 24%, nettement plus élevé qu'à la centrale de Linne à cause de la structure de la turbine, plus petite, avec donc moins d'espace entre les pales et une vitesse de rotation plus rapide. Les turbines des centrales hydroélectriques de la Meuse belge ont des caractéristiques (diamètre de 3,55 m à 5,6 m; vitesse de rotation de 65,2 t/min à 120 t/min) voisines de celles décrites dans les études

précitées et l'on peut raisonnablement considérer que la mortalité des anguilles argentées (longueur moyenne de 82 cm, SONNY *et al.*, 2001) y soit proche des 50%.

Sont également affectés par le passage dans les turbines les jeunes salmonidés (smolts) en route vers leur zone de grossissement en mer ou dans la partie basse des cours d'eau. En général, sur des centrales de faible chute, la mortalité des smolts est assez faible et varie entre 5 à 20 % pour les turbines Kaplan (LARINIER & TRAVADE, 1999). Des études nord-américaines révèlent les mêmes taux de mortalité (6,1%, MATHUR *et al.*, 1996; 3 à 8%, CADA & RINEHART, 2000). On considère que cette relativement faible mortalité des salmonidés au stade de smolt est due à leur petite taille (environ 10-15 cm).

Les blessures et mortalités par passage dans les turbines concernent aussi au plus haut point les espèces de poissons autres que les grands migrateurs diadromes. Des études récentes montrent en effet que la majorité des espèces dites résidentes effectuent des déplacements d'avalaison à caractère saisonnier. Ceux-ci concernent en majorité numérique les jeunes individus de moins de 1 an (0+) qui montrent un profil d'avalaison estival, quelques semaines après leur éclosion (PAVLOV, 1994; REICHARD *et al.*, 2002) mais également en automne (PHILIPPART *et al.*, 2002). A cela s'ajoute le cas des adultes qui dévalent le cours d'eau après leur migration de remontée pour la reproduction, comportement qui s'observe chez la majorité des espèces de la Meuse (29 espèces recensées en montée, PHILIPPART *et al.*, 2002).

Il existe dans la littérature scientifique beaucoup d'informations sur la survie des poissons après le passage dans des turbines, basées sur des campagnes de récolte au filet dans les canaux de fuite des turbines. Ces études révèlent

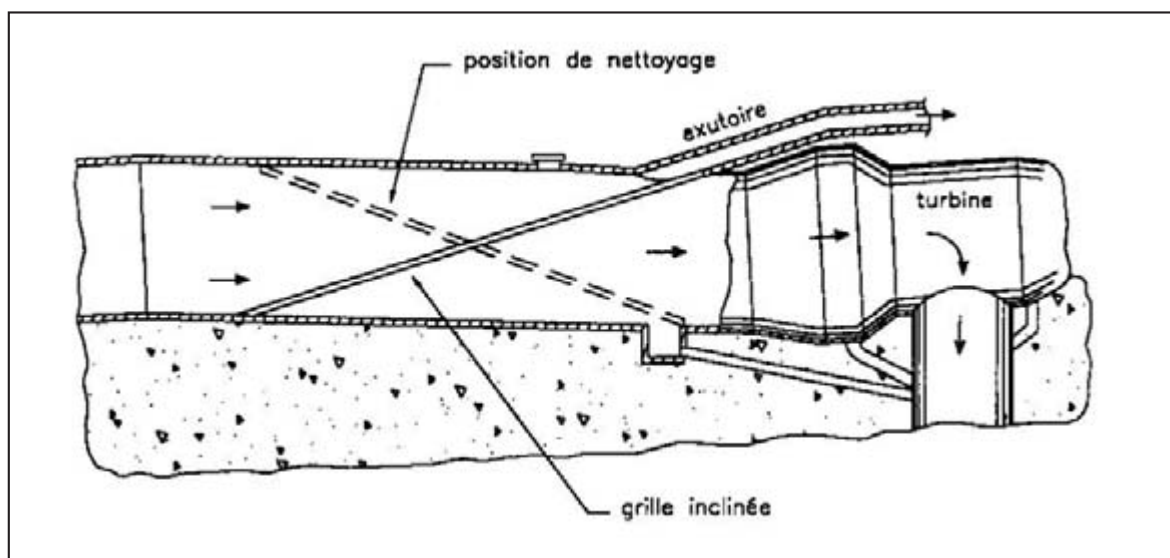


Figure 2 – Vue en coupe d'une grille de déflexion de type "Eicher" (EPRI, 1994). Le panneau de grilles (à barreaux de section triangulaire) est monté sur un axe et peut être nettoyé à contre-courant par pivotement.

des résultats fort variables pour les mêmes espèces et les même tailles de poissons, ce qui met en évidence la complexité du phénomène. Dès lors, pour mieux comprendre les variations de mortalité entre les sites, il faut en étudier les causes (TURNPENNY, 1998; CADA, 2001; PAVLOV *et al.*, 2001). Les sources de blessures et de mortalité des poissons turbinés se rangent en quatre catégories principales (Figure 3, CADA, 2001).

(a) Traumatismes de pression

Le passage dans la conduite d'une turbine implique une descente du poisson dans la colonne d'eau vers le niveau de la turbine, ce qui augmente la pression hydrostatique. L'exposition du poisson au gradient de pression dépend de la profondeur à laquelle il se trouve avant de pénétrer dans la turbine et après, ainsi que des conditions hydrauliques de la turbine (la pression dans une conduite est inversement proportionnelle à la vitesse du courant). Un poisson acclimaté à la pression de surface sera sensible à une augmentation de la pression, et à l'inverse, un poisson acclimaté à la pression du fond sera sensible à la diminution de la pression. Des expériences d'injection de poissons à deux profondeurs différentes (3m et 9m) devant une turbine montrent que le taux de survie est plus faible pour les

poissons injectés en profondeur (0,91 contre 0,97, mais non significatif ; Cada, 2001). Néanmoins, le facteur principal affectant les poissons demeure la décompression, et plus précisément le taux de décompression, D , défini comme :

$$D = 1 - (P1/P2)$$

où $P1$ est la pression initiale au niveau de la turbine et $P2$ est la pression de sortie, souvent égale à la pression de surface, soit la pression atmosphérique. Plus le facteur D augmente, plus les risques de mortalités sont grands, surtout pour les espèces (perche et sandre par ex.) dont la vessie natatoire est fermée (physoclistes, sans canal pneumatique entre la vessie natatoire et le tube digestif). En revanche, les espèces (salmonidés, cyprinidés) qui ont une vessie natatoire ouverte (physostomes) sont plus tolérants à la décompression. La mortalité due à la décompression dépend aussi du stade de vie du poisson, les stades larvaires et juvéniles semblant les moins sensibles (CADA, 1990). Néanmoins, on considère que lorsque $D > 0,6$, les conditions de passage dans les turbines engendrent des mortalités significatives, quelle que soit l'espèce (PAVLOV *et al.*, 2001).

Les poissons morts suite à une trop forte décompression montrent des symptômes classiques : maladie des bulles

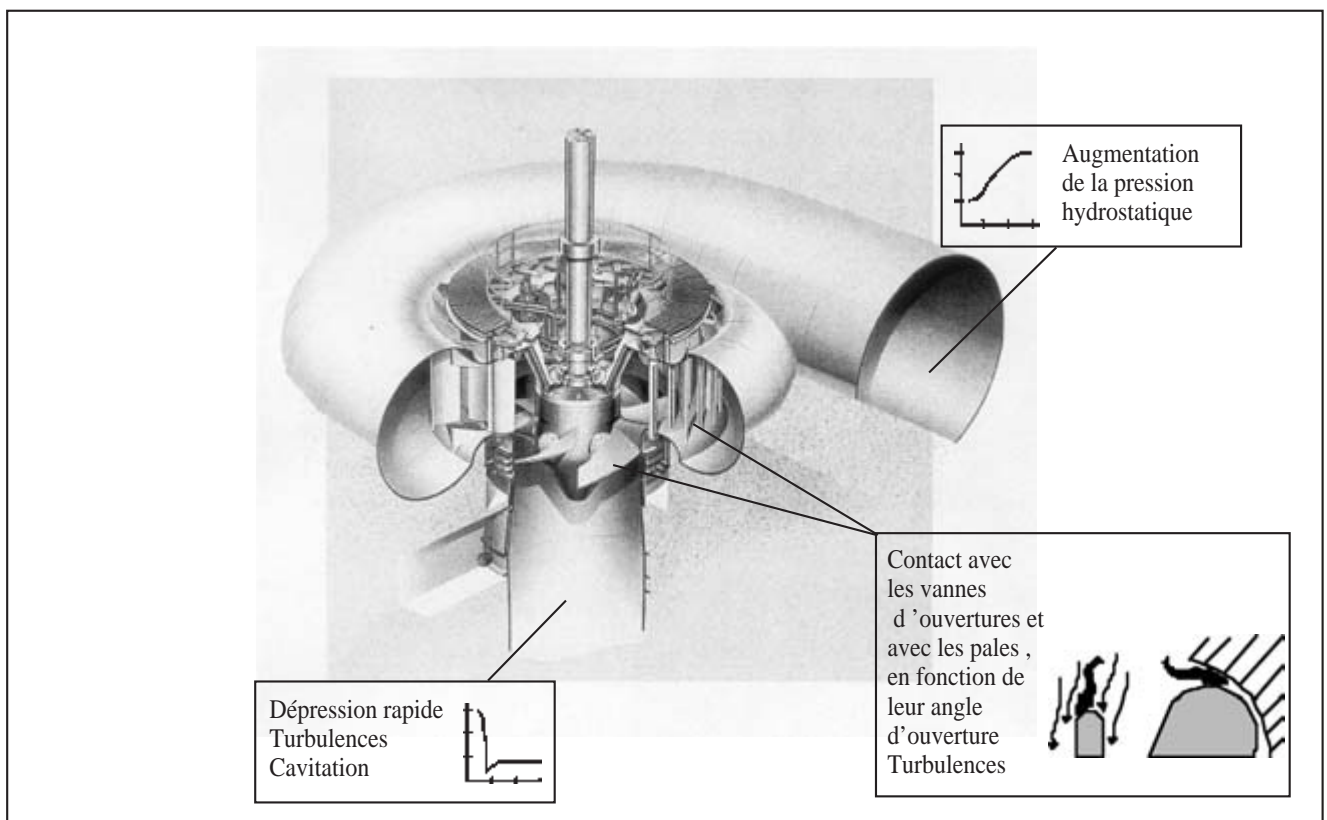


Figure 3 – Schéma d'une turbine de modèle Kaplan et sources des principales lésions associées aux passages des poissons à travers les turbines de ce type.

(embolie gazeuse dans les vaisseaux sanguins), rupture de la vessie natatoire et exophtalmie. Il est évident que ces phénomènes de décompression sont d'autant plus importants que le barrage de retenue est haut. La majorité des micro-centrales belges fonctionnent avec des barrages dont la hauteur maximale est de 5 m. Dans ce cas, le taux de décompression vaut 0,33, ce qui semble acceptable. La profondeur qui correspond à un taux de décompression de 0,6 est 15 m. Les quelques barrages - retenues actuellement en fonction (Bütgenbach, Robertville, Vierre, Plate-Taille) sont certainement concernés.

Face à ce problème, peu de solutions techniques sont envisagées, mais le principe est de minimiser le taux de décompression. La promotion de turbines de chute inférieure à 10 m est dès lors recommandée.

(b) Cavitation

Le phénomène de cavitation apparaît quand la pression dans la turbine passe sous la pression de vapeur, ce qui engendre une vaporisation et donc une ébullition de l'eau. Ensuite, après cette brusque chute associée au passage dans la turbine, la pression remonte progressivement jusqu'à la pression atmosphérique, ce qui fait résorber les bulles de vapeur par condensation, avec une dissipation d'énergie sous la forme d'une onde de choc qui peut atteindre 10 000 kPa (PAVLOV *et al.*, 2001) et constitue une source de mortalité. La pression létale de l'onde de choc varie de 1250 kPa (ablette commune) à 13050 kPa (tanche). L'impact réel de ce phénomène sur la mortalité des poissons est mal connu, mais beaucoup d'auteurs décrivent ce facteur comme affectant sérieusement la survie des stades larvaires particulièrement sensibles (MONTEN, 1985; DAVIES, 1988; CADA, 1990; CADA *et al.*, 1997).

Les problèmes de cavitation concernent surtout les turbines de haute chute d'eau, peu représentées dans la production hydroélectrique belge. Néanmoins, ils doivent être pris en compte, au même titre que les problèmes de décompression, car il s'agit de deux phénomènes liés, dont les solutions sont certainement communes.

(c) Turbulences

Au cours de son passage dans la conduite de la turbine, l'eau adopte un écoulement turbulent dû aux mouvements chaotiques des particules. Les poissons qui passent dans ce type d'écoulement sont exposés à des forces hydrodynamiques causées par les courants turbulents, qui peuvent engendrer diverses lésions comme des retournements des opercules, des torsions de la tête et des cisaillements du corps (PAVLOV *et al.*, 2001). Les stades juvéniles sont particulièrement sensibles à ce phénomène.

Etant donné que la force hydrodynamique des turbulences est fonction de la vitesse de l'eau, il est recommandé d'adopter un mode de turbinage qui minimise l'accélération de l'eau dans la conduite de la turbine. Dès lors, pour un même débit, les turbines de grand diamètre semblent le moins néfastes sur ce plan.

(d) Contact du poisson avec les structures de la turbine

Selon le type de turbine et son mode de fonctionnement, le poisson turbiné peut heurter certaines structures de la turbine: les "portes d'admission de l'eau" (wicket gate), les pales de la turbine au niveau de l'insertion sur l'axe ou de leur extrémité ou les parois de la conduite. La gravité du contact pour le poisson va dépendre de la vitesse du choc (en l'occurrence, du poisson contre une structure, ou d'une structure, une pale par exemple, contre le poisson). On considère qu'un choc de plus de 0,5m/s peut être fatal (Bell, 1990). La probabilité d'entrer en contact avec une pale dépend de la longueur du poisson ainsi que de sa masse corporelle et de son centre de gravité qui vont déterminer en partie (avec les forces hydrodynamiques) sa position par rapport à la pale. Chez l'anguille, on a observé une mortalité de 94 % et 78 % respectivement chez des poissons mesurant en moyenne 74 cm et 57 cm (MONTEN, 1985).

D'une manière générale, les petits poissons restent dans la couche d'eau qui passe entre deux pales, sans entrer en contact avec ces dernières, contrairement aux poissons de plus grande taille. La probabilité de contact poisson/turbine dépend aussi des caractéristiques de la turbine : angle d'ouverture des portes, angle d'attaque des pales, cinétique de rotation, intervalle entre les portes et entre les pales et nombre de pales.

2.4.2. Amélioration de la structure et du mode de fonctionnement des turbines

Comme la plupart des facteurs de blessure et de mortalité des poissons passant dans les turbines ont été identifiés, on s'oriente actuellement vers des modifications de la structure et/ou du fonctionnement des turbines existantes, ainsi que vers la conception de nouvelles turbines "amies des poissons".

Dans le cas des turbines Kaplan, des modifications ont été réalisées pour minimiser les intervalles entre les extrémités des pales et la conduite, ainsi qu'entre la base des pales et l'axe, afin de diminuer la probabilité que les poissons se coincent dans ces fentes. Les premières expériences de comparaison des taux de survie des poissons entraînés dans ces turbines modifiées et dans les turbines conventionnelles ne révèlent toutefois pas de différences significatives (CADA, 2001). Néanmoins, il est utile de prévoir, lors de l'aménagement d'une micro-centrale hydroélectrique, une installation qui minimise les gradients de pression, les vitesses de courant et les vitesses de rotation des turbines et qui permet de diminuer l'incidence du fonctionnement sur la survie des poissons. Le rendement de la production doit aussi être pris en compte de manière à trouver un compromis acceptable entre la rentabilité et le respect de l'environnement.

Des équipes de recherche américaines ont entrepris dans le courant de l'année 2002 des tests de survie des poissons

avec un nouveau type de turbine "amie des poissons" (figure 4.) Il s'agit d'une turbine à une seule pale, mais avec un pas hélicoïdal, comme pour un tire-bouchon. Une fois engagé dans la turbine, le poisson la traverse au sein

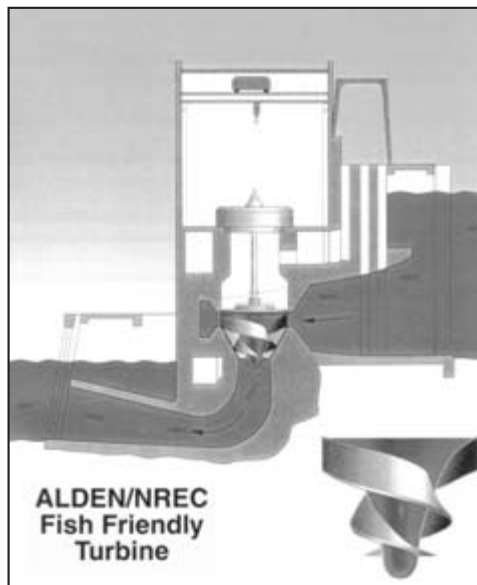


Figure 4 – Schéma d'un prototype de turbine "amie des poissons" en cours d'essais aux Etats-Unis (CADA & RINEHART, 2000).

d'un pas de vis, ce qui permet un déplacement le long du pas sans contact avec la turbine. Les recherches actuellement en cours portent sur un modèle d'environ 1m de diamètre et il est encore difficile de prévoir l'efficacité du système. Néanmoins, les concepteurs soulignent que ce nouveau type de turbine diminuera les risques de blessures mécaniques ainsi que les problèmes de pression et de vitesse de courant, tout en ayant un minimum d'effet sur l'efficacité hydroélectrique de la machine (CADA & RINEHART, 2000).

2.5. PERTURBATIONS ÉCOHYDRAULIQUES DES HABITATS AQUATIQUES LIÉES AUX MODALITÉS DE TURBINAGE

Dans le cas de production intermittente d'hydroélectricité par éclusée, les baisses de niveau en aval enregistrées pendant les phases d'accumulation d'eau au-dessus du barrage et d'arrêt du turbinage peuvent provoquer l'exondation des œufs de poissons pondus sur les graviers (hotu, barbeau, chevaine vandoise) et sur la végétation aquatique (brèmes, carpe, tanche, perche, brochet) ainsi qu'un appauvrissement des habitats stratégiques (nurseries, petits radiers) des jeunes de l'année. Corollairement, la reprise du turbinage génère dans le cours d'eau en aval des pointes de débit (hydropeaking) qui ont un effet de chasse vis-à-vis des petits poissons, surtout ceux d'espèces peu rhéophiles et en période d'après éclosion quand leur capacité de nage est faible (VALENTIN, 1996). Un tel phénomène est particulièrement marqué dans la Meuse en aval de la centrale de Lixhe sur une distance de plusieurs dizaines de kilomètres jusqu'en Grensmaas.

Dans le cas des centrales hydroélectriques de haute chute avec conduite forcée, la restitution de l'eau turbinée dans le cours d'eau en aval du barrage de prise d'eau peut générer un effet de barrière ou de piège hydraulique tels que les poissons migrateurs en remontée ont tendance à rester dans la zone de restitution de l'eau et ne progressent pas plus

haut dans le tronçon à faible débit. Un tel phénomène pourrait se produire à hauteur de la centrale de Heid-de-Goreux sur l'Amblève, alimentée par une conduite forcée venant du barrage de Lorcé-Chevron.

Le régime hydrologique artificiel imposé par les turbinages appauvrit les populations d'invertébrés benthiques et les ressources alimentaires disponibles pour les poissons, d'où un appauvrissement de l'abondance du poisson dans les secteurs de rivière concernés (VALENTIN, 1996). Les variations incessantes du débit à l'aval d'une usine hydroélectrique perturbent aussi l'activité normale des poissons (alimentation notamment) et peuvent entraîner des dépenses énergétiques excessives qui affectent la bonne capacité physique des poissons, avec une incidence sur leur survie et leur reproduction. Les variations

permanentes de débit et de hauteur d'eau dans les parties de cours d'eau soumises aux effets d'un turbinage intermittent (lac de barrage, éclusée en rivière) pourraient être responsables de la régression de la végétation émergée des bords et des noues (hélrophytes) et de la végétation aquatique du cours principal (renoncules). Cette végétation est importante comme support de nourriture, support de ponte (pour le brochet par ex.) et abris des poissons jeunes et adultes (rôle des hélrophytes comme abris des brochets).

Dans les barrages-réservoirs alimentant une centrale hydroélectrique, la diminution du niveau d'eau provoque un marnage plus ou moins important et une exondation d'habitats (berges peu profondes en pente douce; végétation des bords) indispensables pour la reproduction et le recrutement des jeunes chez une espèce de grande valeur halieutique comme le brochet. Cet effet négatif peut être atténué par la mise en place de frayères artificielles flottantes comme cela a été expérimenté sur les lacs de Bütgenbach et de Robertville.

Globalement, pour ce type d'effet lié au mode de turbinage, on retiendra surtout :

- une diminution de la densité-biomasse des populations animales, y compris des poissons, en aval des turbinages en raison de l'instabilité des conditions du milieu, de l'existence de conditions extrêmes (débits très faibles en cas de rétention d'eau ; pics de débit très fort au moment du turbinage) et de la raréfaction de la végétation aquatique;
- une perturbation comportementale et physiologique des poissons associée à l'instabilité artificielle du milieu au point de vue du débit.

La minimisation de ces formes d'incidences écologiques et piscicoles de la production d'hydroélectricité passe par la fixation de règles pour les modalités de turbinage adaptées à chaque situation particulière. Un tel protocole existe pour la centrale hydroélectrique du barrage de la Vierre afin de protéger la faune des poissons de la Semois.

2.6. PROBLÈMES DE QUALITÉ DE L'EAU GÉNÉRÉS PAR LA PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ

Dans les eaux courantes souffrant d'un déficit chronique en oxygène dissous à cause d'une pollution organique, le turbinage de grands débits d'eau pour la production d'hydroélectricité supprime la possibilité de réoxygénation mécanique par la chute d'eau au déversoir du barrage. De plus, le rejet d'eau peu oxygénée en aval des turbines peut provoquer un effet répulsif sur les poissons s'approchant de l'entrée d'une échelle à poissons. Cette situation est régulièrement rencontrée au niveau de la centrale hydroélectrique de Lixhe.

L'élimination plus ou moins fréquente des boues accumulées sur le fond du réservoir en amont du barrage de prise d'eau d'une micro-centrale hydroélectrique peut provoquer une pollution mécanique (dépôt de fines particules de sédiments) et organique (ammoniac NH_3 , H_2S , consommation biochimique en oxygène ou DBO) qui détruit la faune des invertébrés benthiques et peut affecter les poissons peu mobiles. Un tel effet est d'autant plus marqué que le cours d'eau reçoit dans sa partie amont des eaux usées domestiques et/ou industrielles qui ont tendance à décanter sur le fond du plan d'eau-réservoir.

Dans le cas des grands barrages à vocation hydroélectrique totale ou partielle, le turbinage restitue à la rivière en aval de grandes masses d'eau puisées en profondeur du lac, donc froides et mal oxygénées si le plan d'eau est eutrophisé, et qui peuvent perturber complètement l'écologie du cours d'eau récepteur.

La diminution de ces types d'impacts écologiques et piscicoles passe par un réglementation des vidanges programmées ou exceptionnelles des barrages à vocation hydroélectrique ou autre (tourisme).

2.7. EFFETS LIÉS À LA MULTIPLICATION DES USINES HYDRO-ÉLECTRIQUES SUR LES AXES FLUVIAUX

Même équipés d'ouvrages de franchissement à la remontée, les barrages des micro-centrales hydroélectriques agissent de manière cumulative en épuisant les poissons à chaque obstacle et en causant des retards de migration qui peuvent amener les reproducteurs sur les frayères beaucoup trop tard dans la saison de ponte et contribuer à l'échec de la reproduction. À la dévalaison, les (micro)centrales hydroélectriques provoquent des mortalités cumulées qui, en l'absence de mesures appropriées à chaque barrage, peuvent atteindre, chez les anguilles adultes par ex., la presque totalité de la population migratrice d'un axe fluvial.

L'impact piscicole de l'équipement d'un cours d'eau en centrales hydroélectriques est d'autant plus marqué que les ouvrages sont situés dans le cours inférieur des fleuves et cours d'eau où la communauté des poissons comprend une diversité maximale d'espèces (par ex. 25-30 espèces dans la Meuse et la basse Ourthe) parmi lesquelles (effectivement

ou potentiellement) les grands migrateurs amphibiotiques. Dans le cours supérieur des cours d'eau, la communauté comprend naturellement moins d'espèces (par ex. truite commune + petites espèces d'accompagnement) et ce type de milieu est normalement plus représenté dans un bassin (affluents du haut cours) que l'unique bas cours principal.

Pour réduire ce type d'impact, l'unique solution est d'équiper toutes les usines hydroélectriques de dispositifs performants de protection des poissons migrateurs et de limiter le nombre d'usines dans un axe fluvial sur la base d'un dommage maximum acceptable sur l'ensemble de l'axe fluvial concerné au niveau national et international.

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Face à la diversité et à l'intensité des incidences potentielles de la production d'hydroélectricité sur le milieu aquatique et les peuplements de poissons et donc sur la pêche, la promotion et le développement de cette activité dans les cours d'eau belges et des régions voisines ne peut pas raisonnablement se faire sans avoir préalablement défini un certain nombre de règles relatives à l'implantation et au fonctionnement des installations en tenant compte des contraintes imposées par la préservation- restauration de la qualité écologique des écosystèmes aquatiques, de la pêche et des autres loisirs aquatiques concernés. En l'absence de telles dispositions, on court le risque de réaliser, et pour longtemps, des aménagements tout à fait inappropriés dans le contexte d'un véritable développement intégré durable et dont les effets sont susceptibles, dans certains cas, de ruiner les efforts de restauration de la qualité de l'eau consécutifs à la mise en place des coûteuses infrastructures d'épuration des eaux usées domestiques et industrielles. C'est ainsi toute l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques, au sens de la récente Directive Cadre européenne sur l'Eau, qui pourrait être menacée au nom de la protection du climat !

Pour répondre à de telles nouvelles exigences de protection de l'environnement aquatique et de sa faune en rapport avec la production d'hydroélectricité, il existe aujourd'hui des solutions techniques de plus en plus performantes, y compris pour l'aspect crucial du problème qu'est la mortalité directe des poissons résultant du passage forcé dans les turbines. Pour les nouveaux aménagements, il est tout à fait possible d'envisager, dès la conception de l'ouvrage, la mise en œuvre de la plupart des améliorations nécessaires. La situation est plus difficile lorsqu'il s'agit d'améliorer des ouvrages et des équipements anciens conçus, pour la plupart, à une époque où les enjeux environnementaux étaient moindres qu'aujourd'hui et la technologie moins avancée. Mais des possibilités d'amélioration existent comme l'ont démontré les récentes constructions de passes migratoires à salmonidés très performantes aux barrages hydroélectriques mosans de Lixhe, Monsin et Ivoz-Ramet.

Pour éviter de nouveaux conflits d'usage des eaux courantes liés au développement de la production d'hydro-

électricité, il est indispensable et urgent de développer les recherches en hydroécologie, visant à mieux connaître l'incidence écologique et piscicole des différents types de centrales hydroélectriques installées sur nos cours d'eau et d'évaluer, sur des sites pilotes, des dispositifs techniques et des modes de gestion des ouvrages qui permettent de minimiser les incidences environnementales dans un large éventail de situations écologiques (BELPAIRE *et al.*, 2002).

4. REMERCIEMENTS

L'analyse relatée dans cette communication s'inscrit dans le programme des recherches de J.C. Philippart, Chercheur au Fonds national de la Recherche scientifique (FNRS), sur le rôle des facteurs de mortalité dans la dynamique des populations de poissons de la Meuse et de ses affluents. L'étude a été réalisée avec la collaboration de D. Sonny dans le cadre d'un contrat d'études de six mois avec Laborelec.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

- ALMODOVAR, A. & NICOLA, G.G. (1999). Effects of a small hydropower station upon brown trout *Salmo trutta* L. in the River Hoz seca (Tagus basin, Spain) one year after regulation. *Regulated Rivers : Research & Management*, **15**, 477-484.
- BARAS E. & J.C. PHILIPPART (eds), 1996. *Underwater Biotelemetry*, Proceedings of the First Conference and Workshop on Fish Telemetry in Europe, University of Liège, Belgium, vi+ 257 p.
- BELPAIRE, C. (2002). *Verslag van de ICES/EIFAC vergadering Working Group on Eel (WG EEL)*, Nantes (F), 2-7 september 2002.
- BELPAIRE, C.; DE CHARLEROY, D.; COECK, J.; JANSSENS, L. & MONDEN, S. (2002). *Flemish plans for hydropower turbines : additional loss for eel spawning stock?* Communication à l'ICES/EIFAC Working Group on Eel (Nantes, 1-6 septembre 2002). In : Belpaire 2002.
- BELL, C.E. (1990). *Revised compendium on the success of passage of small fish through turbines*. U.S. Army Corps of Engineers. North Pacific Div. Portland (Ore.), 83 pp.
- BERG, R. (1986). Fish passage through Kaplan turbines at a power plant on the River Neckar and subsequent eel injuries. *Vie milieu*, **36**(4), 307-310.
- CADA, G.F. (1990). A review of studies to the effects of Propeller-Type turbine passage on fish early life stages. *North American Journal of Fisheries Management*, **10**, 418-426.
- CADA, G.F., 1998. Fish passage mitigation at hydroelectric power projects in the United States, pp. 208 - 219. In : Jungwirth, M., S. Schmutz & S. Weiss (Eds), *Fish Migration and Fish Bypasses*, Fishing News Books, 438 pages.
- CADA, G.F. (2001). The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, **26** (9), 14-23.
- CADA, G.F., COUTANT, C.C. & WHITNEY, R.R. (1997). Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. U.S. Department of Energy Idaho Operations Office. Idaho Falls (Idaho), 85 pp.
- CADA, G.F. & RINEHART, B.N. (2000). *Hydropower R&D : Recent advances in turbine passage technology*. U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office, 33pp.
- CARLSON, T. (2001). *Proceedings of the turbine passage survival workshop*. June 14-15, 2000. PNNL-SA-33996. U.S. Army Corps of Engineers Portland District, Portland, Oregon.
- CHANSEAU, M., CROZE, O. & LARINIER, M. (1999). Impact des aménagements sur la migration anadrome du saumon atlantique (*Salmo salar* L.) sur le gave de Pau (France). *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, **353/354**, 211-237.
- DAVIES, J.K. (1988). A review of information relating to fish passage through turbines : implications to tidal power schemes. *Journal of Fish Biology*, **33**, 111-126.
- E.P.R.I. (1986). Assessment of downstream migrant fish protection technology for hydroelectric application. Electric Power Research Institute Report RP 2694-1, 420 p., Palo Alto , California.
- E.P.R.I. (1994). *Research update on fish protection technologies for water intakes*. Stone and Webster Eng. Corp., Boston, Massachusetts, 225 p.
- HADDERINGH, R.H., VAN DER STOEP, J.W.; HABAKEN, J.M.P.M. (1992). Deflecting eels from water inlets of power stations with light. *Irish Fisheries Investigations Series A (Freshwater)*, N° **36**, 78-87.
- HADDERINGH, R. & BAKKER, H.D. (1998). Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht Rivers, pp. 315-328. In : Jungwirth, M., S. Schmutz & S. Weiss, S.), *Fish Migration and Fish Bypasses*, Blackwell Science 438 p.
- HADDERINGH, R.H. et M.C.M. BRUIJS, 2002. Hydroelectric power stations and fish migration. *Tribune de l'Eau*, no° 619-620-621, sept/oct-nov/déc 2002-janv/fév 2003.
- JUNGWIRTH, M., S. SCHMUTZ, S. WEISS, 1998. *Fish Migration and Fish Bypasses*, Blackwell Science, 438 pages.
- LARINIER, M., 1983. Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages pour les poissons migrateurs. *Bulletin français de pisciculture*, n° spécial, 39 p.
- LARINIER, M. & DARTIGUELONGUE, J. (1989). La circulation des poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bulletin français de pisciculture*, 312-313, 94 p.
- LARINIER, M. & S. BOYER-BERENARD, S.(1991). La dévalaison des smolts de saumon atlantique au barrage de Poutes sur l'Allier: utilisation de lampes à vapeur de mercure en vue d'optimiser l'efficacité de l'exutoire de dévalaison. *Bulletin français de pisciculture*, **323**, 129-148.
- LARINIER, M.; PORCHER, J.P.; TRAVADE, F. & GOSSET, C. (1994). *Passes à Poissons. Expertise et conception des ouvrages de franchissement*. Conseil Supérieur de la Pêche, Paris, 336 p.
- LARINIER, M. & TRAVADE, F. (1999). La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, **353/354**, 181-210.
- MATHUR, D.; HEISEY, P.G.; EUSTON, E.T.; SKALSKI, J.R. & HAYS, S. (1996). Turbine passage survival estimation for chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. *Canadian Journal of Aquatic Sciences*, **53**, 542-549.

- MONTEN, J.F. (1985). *Fish and turbines : fish injuries during passage through power station turbines*. Stockholm: Vattenfall, 111 pp.
- MUNLV, 2001. *Das Wanderfischprogramm Nordrhein-Wesphalen-Statusbericht zur ersten Programmphase*. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, Düsseldorf, 112 p.
- OVIDIO, M. & PHILIPPART, J.C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. Synthesis of a five years telemetry study in the River Meuse basin. *Hydrobiologia*, sous presse.
- PAVLOV, D.S. (1994). The downstream migration of young fishes in rivers: mechanisms and distribution. *Folia Zoologica*, **43**, 193-208.
- PAVLOV, D.S.; LUPANDIN, A.I. & KOSTIN, V.V. (2001). *Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants*. Russian Academy of Science, 249pp.
- PETITJEAN, M. (1996). *Etat wallon de l'Environnement 1995. 4. Energie*. Ministère de la Région wallonne. Direction Générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Namur, 133 p.
- PHILIPPART, J.C.; MICHA, J.C.; BARAS, E.; PRIGNON, C.; GILLET, A. & JORIS, S. (1994). The Belgian Project "Meuse Salmon 2,000". First results, problems and future prospects. *Water Science and Technology*, **29**(3), 315-317.
- PHILIPPART, J.C.; RIMBAUD, G.; OVIDIO, M. & GILLET, A. (2002). *Biodiversity of fish in the belgian River Meuse, as revealed by the monitoring of fishpasses at the Vise Lixhe Dam*. Workshop on Migration and Free Circulation of Fish in Flanders, Brussels, 14th June 2002.
- PHILIPPART, J.C., D. SONNY, V. RAEMAKERS, 2002. Impact mécanique des prises d'eau et turbines sur les poissons en Meuse liégeoise. *Tribune de l'Eau*, n° 619-620-621, sept/oct-nov/déc 2002-janv/fév 2003.
- PRIGNON, C. & MICHA, J.C. (1995). Etude de la dévalaison et des effets potentiels du turbinage des centrales hydroélectriques sur les saumoneaux. Communication présentée à la Journée d'Information Internationale "Meuse Saumon 2000", Université de Liège, 13 septembre 1995, 4 pages.
- REICHARD, M.; JURAJDA, P. & ONDRACKOVA, M. (2002). Interannual variability in seasonal dynamics and species composition of drifting young-of-the-year fishes in two European lowland rivers. *Journal of Fish Biology*, **60**, 87-101.
- SAND, O.; ENGER, P.S.; KARLSEN, H.E.; KNUDSEN, F. & KVERNSTUEN, T. (2000). Avoidance response to infrasound in downstream migrating European silver eels, *Anguilla anguilla*. *Environmental Biology of Fishes*, **57** : 327-336.
- SOLOMON, D.J., 1992. *Diversion of entrapment of fish at water intakes and outfalls*. National Rivers Authorities R&D Report 1, 51 pages.
- SONNY, D.; RAEMAKERS, V. & PHILIPPART, J.C. (2001). *Etude de l'incidence des prises d'eau des centrales électriques sur les poissons de la Meuse. Cas de la centrale nucléaire de Tihange et de la centrale TGV de Seraing*. Rapport d'études à Laborelec pour la période juin 2000 - novembre 2001. A. Etudes sur le terrain. Décembre 2001, 207pp.
- SOUCHON, Y.; VALENTIN, S. & CAPRA, H. (1998). Peut-on rendre plus objective la détermination des débits réservés par une approche scientifique? *La Houille Blanche*, **8**, 41-45.
- TURNPENNY, A.W.H., 1998. Mechanisms of fish damage in low-head turbines : an experimental appraisal, pp. 300-314. In : Jungwirth, M., S. Schmutz & S. Weiss, S.), *Fish Migration and Fish Bypasses*, Blackwell Science 438 pages.
- VALENTIN, S. (1996). Effets des éclusées hydroélectriques en rivière : diagnostic hydroécologique et aide à la gestion. Exemple de la Fontaulière (Ardèche). *La Houille Blanche*, **5**, 25-31.