LA DÉVALAISON DES MIGRATEURS : PROBLÈMES ET DISPOSITIFS.

M. LARINIER (1) et F. TRAVADE (2)

(1) CSP-CEMAGREF-GHAAPPE, Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

(2) Electricité de France - Etudes et Recherches, 6 Quai Watier, 78401 Chatou Cedex, France.

Reçu le 26 juillet 1999

Accepté le 9 août 1999

Received 26 July, 1999

Accepted 9 August, 1999

RÉSUMÉ

Cet article, qui actualise le chapitre 13 du n°326-327 du Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture des mêmes auteurs, fait le bilan des connaissances actuelles sur la migration de dévalaison au niveau des centrales hydroélectriques, que ce soit sur les dommages induits par le transit des poissons à travers les turbines et par les évacuateurs de crues ou sur la conception des dispositifs spécifiques destinés à éviter l'entraînement dans les prises d'eau. Les divers types de solutions opérationnelles ou prometteuses pour limiter les mortalités (barrières physiques ou comportementales) sont abordés essentiellement vis-à-vis des salmonidés migrateurs pour lesquels on dispose d'un retour d'expérience conséquent. On insiste sur la conception et l'utilisation des exutoires de surface associés aux grilles de prises d'eau, qui représentent la solution la plus immédiatement utilisable sur la plupart des microcentrales en France. La problématique relative aux autres espèces est abordée.

Mots-clés : migration de dévalaison, aménagement hydroélectrique, prise d'eau, turbines, déversoirs, mortalités, dispositifs de franchissement, barrière physique, barrière comportementale, exutoire de surface.

DOWNSTREAM MIGRATION : PROBLEMS AND FACILITIES

ABSTRACT

This paper, which is an update of chapter 13 of the N°326-327 of the Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture by the same authors, deals with downstream migration problems, namely fish damage in spillways and hydraulic turbines and design of fish devices which are used to prevent entry of downstream migrants into intakes. Various operational or promising techniques (screening and other behavioural diversion barriers)

are presented. They are mainly related to migratory salmonids for which a lot of experiments have been conducted. The authors focus on the design and use of surface bypasses installed near intake bar racks which are the most promising devices for small hydroelectrical plants in France. Problems related to other migratory species are presented.

Key-words : downstream migration, hydroelectric power plant, intake, turbine, spillway, mortality, fish passage facilities, physical barriers, behavioural barrier, surface bypass.

GÉNÉRALITÉS

La technique des dispositifs destinés à assurer la dévalaison est beaucoup moins avancée que celle portant sur les passes à poissons. Cela tient au fait que les efforts pour le rétablissement de la libre circulation des migrateurs se sont portés dans un premier temps sur la construction d'ouvrages de franchissement à la montée, les problèmes de la dévalaison n'ayant été abordés que plus récemment. Cela tient aussi à ce que la mise au point de dispositifs efficaces pour la dévalaison est beaucoup plus délicate et complexe que celle des passes à poissons. Ce fait n'est pas spécifique à la France, aucun pays ne pouvant à l'heure actuelle prétendre avoir résolu de manière vraiment satisfaisante les problèmes liés à la dévalaison, en particulier au niveau des gros ouvrages (EPRI, 1986, 1994 ; RUGGLES, 1992 ; OTA, 1995).

ESPÈCES ET STADES CONCERNÉS PAR LA DÉVALAISON

La dévalaison ou « avalaison », c'est-à-dire la migration qui s'effectue en descendant les cours d'eau vers la mer ou vers un lac, ou encore d'un affluent vers un axe, concerne des individus de stades de développement variables suivant les espèces. Pour les espèces considérées comme migratrices dans la législation française, les stades concernés sont les suivants :

- saumon atlantique (*Salmo salar*) et truite de mer (*Salmo trutta trutta*) : juvéniles partant en mer pour leur grossissement (smolts) et adultes après la reproduction. La préservation des adultes de truite de mer est plus importante dans la mesure où les fraies multiples sont beaucoup plus fréquentes que chez le saumon, limitées à quelques pour-cent ;

- grande alose (*Alosa alosa*) et alose feinte (*Alosa fallax*) : juvéniles pour les deux espèces et adultes après la reproduction pour l'aloise feinte ;

- anguille (*Anguilla anguilla*) : adultes lors de la migration de reproduction ;

- lamproie marine (*Petromyzon marinus*) et lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*) : juvéniles et également les adultes pour la lamproie fluviatile ;

- truite commune (*Salmo trutta fario*) et ombre commun (*Thymallus thymallus*) : dévalaison des juvéniles lors de la migration de colonisation des secteurs de grossissement et des adultes après la reproduction ;

- brochet (*Esox lucius*) : les juvéniles et les adultes peuvent être concernés.

Bien que non mentionnées dans la législation, la plupart des espèces considérées comme sédentaires effectuent des déplacements significatifs vers l'amont ou l'aval durant leur cycle de vie, déplacements pouvant être liés à la reproduction, à la colonisation, à la dispersion ou à la recherche de nourriture.

La fenêtre de la dévalaison est plus ou moins large suivant l'espèce, la majeure partie de la migration s'effectuant en général lors de quelques pics bien marqués.

PROBLÈMES POSÉS DANS LES COURS D'EAUX AMÉNAGÉS

L'installation d'un barrage sur un cours d'eau induit divers problèmes aux migrateurs lors de la dévalaison : retards plus ou moins longs dans la migration lors du passage dans les retenues, dommages suite au transit par les déversoirs et évacuateurs de crues ou par les turbines, mortalités dues à la modification de la qualité de l'eau (déficit en oxygène dissous dans les retenues, sursaturation en gaz atmosphérique à l'aval des évacuateurs de crues), surexposition aux prédateurs dans les retenues comme en aval des aménagements. Seuls les problèmes spécifiques directement liés aux aménagements hydroélectriques seront considérés dans la suite. On n'abordera pas, en particulier, les impacts induits par la modification de la qualité de l'eau.

En règle générale, ces problèmes n'ont été abordés que pour les salmonidés ; il n'existe que très peu d'information sur les autres familles de migrateurs. Sauf mention spéciale, tout ce qui suit est donc relatif aux juvéniles de salmonidés grands migrateurs.

Passage par les déversoirs et évacuateurs de crues

Le passage par les déversoirs et évacuateurs de crues peut entraîner des mortalités directes (blessures, chocs...) ou indirectes (sensibilité accrue à la prédation des poissons choqués ou désorientés). Les études conduites sur plusieurs sites à l'étranger (USA, Canada...) ont montré que ces mortalités étaient extrêmement variables d'un site à l'autre : 0 % à 4 % pour les barrages de Bonneville, McNary et John Day sur la rivière Columbia (chutes d'une trentaine de mètres de hauteur), 8 % au barrage de Glines (60 m de hauteur) et 37 % au barrage de Lower Elwha sur la rivière Elwha (BELL et DELACY, 1972 ; RUGGLES, 1980 ; RUGGLES et MURRAY, 1983).

Les causes de mortalité sont de plusieurs ordres : cisaillement hydraulique et abrasion sur les déversoirs et dans les turbulences en pied de chute, variations brusques des vitesses et des pressions lors de l'impact sur le plan d'eau et chocs mécaniques sur les radiers ou les dissipateurs d'énergie. La manière dont l'énergie est dissipée au niveau de l'évacuateur peut avoir un effet considérable sur les dommages subis par les poissons.

Lors du franchissement d'un déversoir, le poisson peut soit demeurer confiné dans la lame d'eau, soit se désolidariser de cette lame et tomber en chute libre.

Des expérimentations ont mis en évidence que le poisson en situation de chute libre commence à subir des dommages significatifs (lésions au niveau des branchies, des yeux et des organes internes) dès que sa vitesse d'impact sur le plan d'eau dépasse 16 m/s et ce, quelle que soit sa taille (BELL et DELACY, 1972). Cette vitesse critique est atteinte après une chute variable suivant la taille du poisson : environ 30-40 m pour des poissons de 15-18 cm et 13 m seulement pour les poissons d'une taille supérieure à 60 cm.

Le poisson en situation de chute libre atteint, à partir d'une certaine hauteur de chute, une vitesse limite qui est fonction de sa taille : de l'ordre de 16 m/s pour des poissons de 15-18 cm, plus de 58 m/s (vitesse atteinte après plus de 200 m de chute) pour des poissons de 60 cm.

Les poissons de petite taille, dont la vitesse limite demeure inférieure à cette vitesse critique de 16 m/s, ne subissent par conséquent aucun dommage quelle que soit la hauteur de la chute. Les poissons de taille plus importante ne subissent aucune mortalité tant que la vitesse d'impact demeure inférieure à cette vitesse critique, ce qui correspond à une chute variant d'une douzaine de mètres pour les gros individus (taille > 60 cm) et à une trentaine de mètres pour les poissons de la taille d'un smolt de saumon atlantique, pour lesquels la vitesse terminale est très proche de la vitesse critique.

Pour un poisson pénétrant dans le bief aval en demeurant confiné à l'intérieur de la lame d'eau, à condition que la décélération ne s'effectue pas dans un volume trop réduit ou que le jet ne subisse pas un impact mécanique ou une déflexion trop brutale, la survie serait identique (BELL et DELACY, 1972) à celle résultant d'une chute libre induisant la même vitesse d'impact au niveau du plan d'eau. Une lame d'eau atteint la vitesse critique à partir de laquelle le poisson subit des dommages au bout de 13 m de chute. Au-dessus de cette limite, les mortalités peuvent devenir significatives et augmentent très rapidement avec la chute (100 % de mortalité pour 50-60 m de chute).

En conclusion, pour les poissons de petite taille (longueur inférieure à 15-18 cm), il est toujours moins dommageable de tomber en chute libre dans la mesure où leur vitesse terminale est inférieure à la vitesse critique ; par contre, pour les poissons de plus grande taille, il est équivalent de tomber en chute libre ou de demeurer confiné dans la lame d'eau.

Dans tous les cas, les chances de survie sont d'autant plus grandes que la turbulence et la puissance dissipée volumique en pied de chute sont faibles, et que les chocs mécaniques sont réduits (volume d'eau suffisant, absence de dissipateurs d'énergie ou plus généralement de structures agressives).

Les déversoirs en « saut de ski » sont préférables aux autres types d'évacuateurs, et ceci tout particulièrement pour les poissons de petite taille (RUGGLES et MURRAY, 1983) : l'abrasion sur le parement du déversoir est réduite, le jet peut être partiellement dispersé avant son impact au pied de l'évacuateur et le poisson a la possibilité de tomber en dehors de la veine d'eau.

En France, le passage des poissons par les ouvrages évacuateurs est rarement un problème : les aménagements situés sur les cours d'eau à grands migrateurs ont généralement des chutes modérées, inférieures à une dizaine de mètres. Les ouvrages évacuateurs peuvent constituer de ce fait le meilleur chemin pour minimiser les dommages lors de la dévalaison, à condition de veiller à ce que la réception des poissons à l'aval se fasse dans de bonnes conditions.

Passage dans les turbines hydrauliques

Le passage à travers les turbines hydrauliques soumet le poisson à diverses contraintes susceptibles d'entraîner des mortalités importantes : risques de chocs contre les parties fixes ou mobiles de la turbine (au niveau des directrices, des aubes ou des pales de la roue), accélération et décélération brutales (passage de 3-5 m/s en entrée de roue à 10-30 m/s dans la roue), variations très brutales de pression et cavitation.

De nombreuses expérimentations ayant fait l'objet de plusieurs synthèses (BELL, 1981 ; MONTREAL ENGINEERING COMPANY, 1981 ; MONTEN, 1985 ; EICHER, 1987 ; LARINIER et DARTIGUELONGUE, 1989 ; EPRI, 1992) ont été menées dans divers pays (USA, Canada, Suède, Ecosse, Allemagne, France), principalement sur les juvéniles de salmonidés, et plus rarement sur les clupéidés et les anguilles, pour déterminer les mortalités résultant du transit dans les principaux types de turbines.

Les mortalités sont très importantes sinon totales dans les turbines à action (du type Pelton par exemple) ; mais, fort heureusement, ces turbines, réservées aux très hautes chutes, ne sont que très rarement implantées sur les cours d'eau à grands migrateurs. Elles peuvent cependant concerner des cours d'eau à truites.

Les mortalités des juvéniles de **salmonidés** dans les turbines Francis et Kaplan sont très variables en fonction des caractéristiques de la roue (diamètre, vitesse de rotation...), de leur régime de fonctionnement, de la hauteur de chute ainsi que de l'espèce et de la taille du poisson concerné. Elles varient de moins de 5 % à plus de 90 % dans les turbines Francis. Elles sont en moyenne plus faibles dans les turbines Kaplan, de 5 % à 20 % environ. Cette différence entre les deux types de turbines provient du fait que les turbines Francis sont généralement installées sous des chutes plus fortes et que les roues sont situées à des hauteurs plus importantes au-dessus du plan d'eau aval, ce qui augmente la dépression en sortie de roue. Lorsque ces deux types de turbines sont installés sur une même chute et transitent des débits identiques, elles induisent des dommages comparables.

Les mortalités peuvent s'avérer plus importantes pour certaines espèces. Chez les **poissons physostomes** (salmonidés, clupéidés, cyprinidés...), la régulation de la pression de la vessie natatoire peut se faire relativement rapidement par la bouche *via* le canal pneumatique. Ces espèces résistent bien aux variations brusques de pression. Par contre, chez les **poissons physoclistes** (perche, sandre...), la régulation de la pression se fait beaucoup plus lentement par échange gazeux avec les vaisseaux sanguins de la paroi de la vessie natatoire. Le risque de rupture de la vessie natatoire suite à un abaissement brutal de pression est donc beaucoup plus important.

Les mortalités sur **l'anguille** adulte (*Anguilla anguilla*) sont généralement plus élevées, à cause de sa taille (70-90 cm). On peut considérer les mortalités comme étant 4 à 5 fois plus importantes que celles observées sur les juvéniles de salmonidés : mortalités de l'ordre de 15 % à 30 % dans les turbines de basse chute, avec des valeurs minimales observées voisines de 10 % sur des groupes bulbes à gros diamètres équipés de 3 pales (DESROCHERS, 1994 ; HADDERINGH et BAKKER, 1998) ; ces mortalités dépassent 50 % dans les turbines de plus petite taille équipant la plupart des microcentrales (MONTEN, 1985 ; LARINIER et DARTIGUELONGUE, 1989).

Jusque dans les années 1990, les expérimentations semblaient indiquer que les juvéniles d'**aloses** étaient beaucoup plus sensibles que les juvéniles de salmonidés au passage dans les turbines : des mortalités atteignant 65 % à 85 % ont été estimées dans des turbines où elles étaient de l'ordre de 10 % à 15 % sur les juvéniles de salmonidés (TAYLOR et KYNARD, 1985). Des expérimentations récentes, faisant appel à de nouvelles techniques (marquage individuel des poissons par des ballons qui se gonflent après le passage dans la turbine et ramènent le poisson en surface), indiquent que ces mortalités sont en réalité du même ordre de grandeur que celles observées sur les salmonidés (RUGGLES, 1992 ; HEISEY *et al.*, 1993). Elles auraient été surestimées du fait des protocoles expérimentaux, en particulier des dispositifs de récupération utilisés induisant des mortalités importantes sur les lots témoins.

Diverses équations prédictives de la mortalité ont été proposées, avec plus ou moins de succès. Une étude réalisée en France (LARINIER et DARTIGUELONGUE, 1989) a permis de dégager des formules prédictives de mortalités sur les juvéniles de salmonidés et les anguilles dans les turbines Francis et Kaplan à partir des principales caractéristiques de la turbine et de la taille des poissons.

Dans le cas des turbines **Francis**, l'équation de régression expliquant le mieux la mortalité pour les juvéniles de salmonidés est la suivante :

$$P = [\text{SIN}(-4,21 + 1,25 V^{0,821} + 2,28 N^{0,19} (TL/\text{esp})^{0,84} W^{0,71})]^2 \quad (R^2 = 0,76) ;$$

où P est la part de mortalité (comprise entre 0 et 1), V (m/s) et W (m/s) les vitesses absolue et relative à l'entrée de la roue, N (trs/mn) la vitesse de rotation de la roue, TL (m) la longueur du poisson et esp (m) l'espacement inter-aubes calculé à mi-aube en entrée de roue.

Cette expression, dans la mesure où elle fait intervenir les caractéristiques des triangles des vitesses en entrée de roue, a l'inconvénient de nécessiter pour son calcul une bonne connaissance de la géométrie de la roue et de son régime de fonctionnement. On propose l'expression suivante qui explique une part légèrement plus faible de la variance mais qui peut se calculer à partir de paramètres plus facilement accessibles :

$$P = [\text{SIN}(6,54 + 0,218 H + 118 TL - 3,88 Dm + 0,0078 N)]^2 \quad (R^2 = 0,72) ;$$

où H (m) est la hauteur de chute nette, N (trs/mn) la vitesse de rotation de la roue, Dm (m) le diamètre de la roue en entrée à mi-aubes et TL (m) la longueur du poisson.

Pour les turbines **Kaplan**, les facteurs influant sur la mortalité sont moins évidents. Cela peut s'expliquer par le fait que les conditions de vitesse auxquelles est soumis le poisson à l'entrée de la roue sont très différentes suivant qu'il passe près du moyeu ou à la périphérie : la variabilité des mortalités intra-turbine peut être presque aussi importante que la mortalité inter-turbine.

Les seuls paramètres intervenant de manière significative sur la mortalité sont la longueur du poisson TL (m) et l'espacement inter-pales calculé à mi-pale esp (m) :

- Pour les juvéniles de salmonidés :

$$P = [\text{SIN}(13,4 + 42,8 (TL/\text{esp}))]^2 \quad (R^2 = 0,35) ;$$

- Pour les anguilles :

$$P = [\text{SIN}(28,6 + 48,7 (TL/\text{esp}))]^2 \quad (R^2 = 0,72).$$

Les expressions précédentes permettent d'apprécier l'ordre de grandeur des mortalités et de mettre en évidence les installations susceptibles d'induire des dommages importants. Elles ont cependant tendance à surestimer quelque peu les mortalités induites par les grosses turbines de type Kaplan de très basses chutes, qui ne sont que de quelques pour-cent sur les juvéniles de salmonidés. Cela provient de la transformation de variable en arcsinus, dont sont issues les expressions précédentes : cette transformation, préconisée dans les statistiques portant sur les pourcentages, n'est pas aussi performante sur les valeurs extrêmes (au voisinage de 0 % et de 100 %) qu'elle ne l'est sur les autres valeurs. Il conviendrait de reprendre les analyses en travaillant directement sur les pourcentages, en acceptant cependant le risque de prédire des mortalités négatives, ou au contraire supérieures à 100 %, pour certaines turbines.

Prédation

La création d'aménagements hydroélectriques conduit à accroître la mortalité naturelle des migrateurs en les rendant plus vulnérables aux prédateurs (poissons ou oiseaux) au voisinage des installations. Ce fait peut s'expliquer par l'accumulation des poissons carnassiers dans les retenues, par la présence de turbulences et zones de recirculation au pied des barrages susceptibles de piéger les migrateurs, ou par leur vulnérabilité accrue après passage à travers les turbines, compte tenu de leur état de

choc, de stress ou de leur désorientation. Peu de données existent, mais sur certains sites, la prédation estimée peut atteindre plusieurs dizaines de pour-cent. Des mortalités de 32 % ont été constatées sur des poissons relâchés dans les remous au pied des évacuateurs de crues de deux aménagements de la Snake River (RUGGLES et MURRAY, 1993). Dans certains cas particuliers, cette prédation peut même remettre en cause les possibilités de restauration des populations de migrateurs. On citera le cas de deux cours d'eau du Danemark où la présence de retenues artificielles de faible profondeur et de temps de séjour important se traduit par une mortalité de 81 à 85 % sur les smolts d'élevage de truite de mer et plus de 99 % sur les smolts de saumon (RASMUSSEN *et al.*, 1996).

Entraînement dans les prises d'eau industrielles ou agricoles

Du fait de leur comportement migratoire les incitant à suivre le courant, les migrateurs en avalaison sont susceptibles de se laisser entraîner dans tous les types de prises d'eau : centrales thermiques, usines, canaux d'irrigation... Les risques d'entraînement sont avant tout fonction de la configuration de la prise d'eau et du rapport du débit prélevé sur le débit du cours d'eau. Les dommages sont spécifiques à chacune des installations et doivent être examinés cas par cas.

En France, les pompages posant des problèmes d'entraînement se situaient au niveau des prises d'eau des centrales nucléaires fonctionnant en circuit ouvert (St Laurent des Eaux et Chinon sur la Loire par exemple). Ces centrales sont aujourd'hui arrêtées et ont été remplacées par des centrales fonctionnant en circuit fermé (emploi de réfrigérants atmosphériques) dont le débit est généralement faible (quelques pour-cent) par rapport à celui du cours d'eau. Sur certains cours d'eau, ce sont les prises d'eau d'irrigation se terminant généralement en cul de sac, ou les prises d'eau de piscicultures, qui peuvent s'avérer les plus dommageables.

OUVRAGES DE PROTECTION DES POISSONS AU NIVEAU DES PRISES D'EAU

Généralités

Les dispositifs de franchissement pour la dévalaison ont deux objectifs : éviter l'entraînement des poissons par les turbines ou plus généralement dans les prises d'eau (hydroélectricité ou irrigation) mais également assurer leur guidage vers un by-pass (ou exutoire) leur permettant de contourner sans dommage l'aménagement.

Il existe une grande variété de dispositifs destinés à éviter l'entraînement des poissons dans les prises d'eau ; ces dispositifs ont une efficacité très variable. On peut distinguer les barrières physiques et les barrières comportementales, toutes deux étant systématiquement associées à des exutoires permettant le transit (ou le cas échéant la capture et le transport) des poissons à l'aval de l'obstacle.

Barrières physiques

Une première solution pour empêcher le transit des poissons dans les turbines consiste à les arrêter au droit des prises d'eau par des grilles d'un espacement tel qu'il interdise physiquement le passage du poisson.

Surface du plan de filtration

Ce sont généralement les capacités de nage des espèces considérées qui déterminent la surface du plan de filtration. La composante de la vitesse normale au plan de filtration doit en effet être suffisamment faible pour permettre aux poissons de nager pendant le temps nécessaire à la découverte du ou des exutoires, faute de quoi les

mortalités par placage contre les grilles peuvent devenir supérieures à celles subies lors du transit dans les turbines.

La vitesse d'écoulement maximale à adopter au droit du plan de grille (composante normale à la grille mesurée à une dizaine de centimètres en amont) doit être fonction des capacités de nage des espèces et stades considérés. On peut préconiser comme limite à cette vitesse normale au plan de grille une valeur de l'ordre de 3 L/s (L étant la longueur totale du poisson), correspondant à la limite supérieure de la vitesse de croisière, soit environ 45 cm/s pour les smolts de saumon atlantique (15-20 cm). Ces valeurs peuvent être rapprochées des critères proposés en Ecosse (30 cm/s pour les smolts de saumon atlantique, AITKEN *et al.*, 1966). Aux USA, les valeurs des vitesses admissibles sont généralement plus faibles, en particulier sur la côte Ouest, où les espèces sont de petites tailles : 15 cm/s pour les juvéniles de moins de 6 cm, 25 cm/s pour les juvéniles de plus de 6 cm (CLAY, 1961, 1995 ; ASCE, 1995).

Orientation du plan de grilles

Les grilles doivent assurer le guidage des poissons vers un exutoire, ce qui est obtenu en disposant le plan de grille de biais par rapport à la direction générale de l'écoulement dans le canal d'amenée :

- le plan de filtration peut être disposé verticalement, et obliquement par rapport à la direction de l'écoulement, l'exutoire étant aménagé dans l'angle aval du plan de filtration ;

- le plan de filtration peut être disposé non plus verticalement mais avec une forte inclinaison par rapport à la verticale, l'exutoire étant aménagé dans la partie supérieure du plan de filtration.

L'inclinaison du plan de filtration (par rapport à la direction de l'écoulement), est dans tous les cas inférieure à 45°, et peut descendre à moins de 20° sur certaines installations. Cette inclinaison crée une composante de la vitesse parallèle au plan de filtration (vitesse tangentielle de guidage), qui peut atteindre suivant l'inclinaison d'une à trois fois la composante normale au plan de filtration.

Types de grilles

Les panneaux de filtration peuvent être constitués de grilles classiques à barreaux de sections rectangulaires, de tôles perforées, de grillages à mailles carrées ou rectangulaires, ou de grilles à fil triangulaire soudé (grilles « Johnson »).

L'espacement des barreaux ou la dimension des mailles du grillage est fonction de la taille des plus petits individus à arrêter. Dans le cas des grilles à barreaux, on peut considérer qu'un espacement inférieur au 1/10 de la longueur du poisson (L) s'avère suffisant pour bloquer ce dernier. Même si cet espace interdit le passage du poisson, celui-ci peut cependant rester coincé entre les barreaux : pour éviter tout risque, il convient de réduire cet espacement à L/15 environ.

Conditions hydrodynamiques dans le canal d'amenée à l'approche du plan de filtration

L'efficacité d'une barrière physique est liée à sa capacité à guider les poissons vers l'exutoire. Non seulement les vitesses doivent rester compatibles avec les capacités de nage des espèces et stades considérés, mais le champ de vitesse doit être régulier, sans zones de recirculation, accélérations ou non-uniformités susceptibles de perturber le guidage du poisson vers l'exutoire.

Exutoire

L'efficacité de la barrière physique est enfin très étroitement liée à celle de l'exutoire, qui ne doit pas être répulsif pour les migrateurs (voir § sur les exutoires).

Protection et entretien

La barrière doit être maintenue propre et exempte de colmatage, celui-ci ayant pour effet de modifier les champs de vitesse et pouvant induire de sérieux dysfonctionnements (accélération locale induisant le placage des poissons contre les grilles). Des grilles grossières sont généralement installées en amont de façon à protéger la grille fine de l'impact des corps dérivants et à limiter les problèmes d'entretien et de maintenance.

Exemples de barrières physiques

Divers types de barrières physiques ont été utilisées, certaines ayant démontré des efficacités élevées et proches de 100 % :

- panneaux de grilles fines à mailles rectangulaires (2,5 cm x 1,25 cm pour les smolts de saumon atlantique) installés temporairement sur les grilles de prises d'eau utilisées en Ecosse (AITKEN *et al.*, 1966). L'installation de ces grilles impose de très lourdes contraintes, tant de dimensionnement des prises d'eau (de façon à respecter le critère sur les vitesses d'approche, inférieures à 0,30 m/s) que d'entretien (nécessité de démontage des grilles par panneaux pour en effectuer le nettoyage).

- grilles fines verticales inclinées par rapport à l'écoulement (Figure 1), fréquemment utilisées aux USA (ASCE, 1995). Suivant la largeur du canal, ces grilles sont disposées en biais (d'un bord à l'autre du canal) ou en V (plusieurs V juxtaposés) pour en réduire la longueur. L'angle de la grille par rapport au courant doit être aussi faible que possible (15° à 45°) de façon à guider les poissons vers l'exutoire situé à leur extrémité aval, ce qui augmente par ailleurs leur capacité d'autonettoyage. Elles peuvent se révéler très efficaces, à condition que les vitesses d'approche demeurent relativement uniformes.

Figure 1

Plan de l'écran physique de la prise d'eau de Wapatox (d'après EPRI, 1994).

Figure 1

Layout of angled screen facility at the Wapatox Diversion (source : EPRI 1994).

Figure 2
Plan d'une prise d'eau à tambours rotatifs.

Figure 2
Layout of angled rotary drum screen.

- tambours rotatifs cylindriques (Figure 2), utilisés dans les canaux d'irrigation sur la côte Ouest des USA (NIETZEL *et al.*, 1990 ; RAINEY, 1990). Ces grilles, motorisées sur les grosses installations, constituent une solution très efficace pour le détournement des poissons dans des canaux de faible profondeur (< 2 m). Les dimensions des tambours existants varient de 45 cm de diamètre et 90 cm de longueur à près de 6 m de diamètre et 7 m de longueur. Les tambours sont généralement constitués de grillage en fil d'acier inoxydable (mailles carrées de 3,2 mm). L'axe des tambours, orienté sur les premières installations perpendiculairement à la direction de l'écoulement, est maintenant disposé obliquement avec un angle de 26° par rapport à la direction générale de l'écoulement dans le canal de prise pour améliorer le guidage (rapport des composantes des vitesses tangentielle et normale au plan des tambours égal à 2).

- grilles déflectrices installées au niveau des grosses prises d'eau des aménagements hydroélectriques de la côte Ouest des USA (rivière Columbia), équipés de turbines dont les débits nominaux sont supérieurs à $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces grilles consistent en des panneaux de 6 à 12 m de longueur installés en biais dans la partie supérieure de la prise d'eau de chaque turbine (Figure 3) et qui détournent les poissons vers les puits à batardeaux à partir desquels ils peuvent accéder à un dispositif de dévalaison (WILLIAMS, 1990 ; TURNER *et al.*, 1993). Les efficacités de ces dispositifs se sont avérées très variables (20 % à 75 %), suivant les espèces considérées et surtout suivant les conditions hydrauliques au niveau du plafond des prises d'eau des turbines.

Figure 3
Grilles déflectrices immergées.

Figure 3
Submerged travelling screen.

Figure 4
Schéma de principe (coupe) de la grille déflectrice « Eicher » (d'après EPRI, 1994).

Figure 4
Conceptual section view of Eicher screen (source : EPRI, 1994).

- grilles « Eicher » (EICHER, 1985), destinées à être installées dans les conduites d'amenée d'eau vers les turbines, dont le principe est de défler les poissons vers un by-pass à l'aide d'un panneau de filtration très incliné (Figure 4). Cet écran est constitué d'un panneau de grilles à barreaux de section triangulaire de 2 mm espacés de 2 mm. La vitesse maximale débitante dans la conduite est d'environ 2,4 m/s. Les vitesses normales au plan de grille et au droit du by-pass sont respectivement de 0,45 m/s et 1,5 m/s. Le panneau de grilles est monté sur un axe et peut être nettoyé à contre-courant par pivotement. L'avantage principal de ce type de grille est de pouvoir fonctionner correctement avec des vitesses d'approche élevées : des taux de déflexion supérieurs à 99 % et des taux de survie supérieurs à 90 % ont été obtenus sur des alevins et smolts de saumon du Pacifique de plusieurs espèces (10-50 mm), avec des vitesses d'approche atteignant 2 m/s. Ce type de grille s'est révélé par ailleurs pratiquement autonettoyant. L'installation, à l'amont, de grilles grossières de protection est indispensable pour limiter la dimension des débris entraînés dans la prise, sachant que lors du nettoyage tous les débris accumulés sur le panneau transitent par la turbine (WINCHELL *et al.*, 1993).

- grilles « MIS » (Modular Inclined Screen). L'EPRI (TAFT *et al.*, 1992) a développé récemment un nouveau concept de barrière physique de guidage dérivé des grilles « Eicher » mais destiné à être utilisé dans des ouvrages à surface libre (prises d'eau de microcentrales par exemple). Ce dispositif se compose d'une entrée profilée comportant des grilles grossières, d'un panneau de grilles à barreaux de section triangulaire faisant un angle de 10° à 20° avec l'écoulement, et d'un exutoire de surface permettant l'évacuation des poissons par l'intermédiaire d'une conduite (Figure 5). L'écran est monté sur un pivot comme les grilles « Eicher ». Le travail de développement effectué par l'EPRI s'est révélé prometteur pour plusieurs espèces et pour des vitesses d'approche très variables, de 0,6 m/s à près de 3 m/s (TAFT *et al.*, 1993).

Barrières comportementales

Il s'agit de dispositifs induisant le déplacement des poissons dans une direction donnée grâce à divers stimuli agissant sur leur comportement (attraction, répulsion, guidage). Ces barrières sont intéressantes pour les exploitants dans la mesure où contrairement aux barrières physiques, elles ne présentent généralement que de faibles contraintes de nettoyage et de protection contre le colmatage.

Les stimuli visuels, auditifs, hydrodynamiques et électriques ont donné lieu à un grand nombre de barrières expérimentales : écran lumineux attractif ou répulsif, écran à bulles, écran sonore, écran à chaînes fixes et mobiles, écran hydrodynamique (« louvers » ou écran à persiennes) et écran électrique. Des résultats prometteurs ont été obtenus sur un certain nombre d'écrans expérimentaux en laboratoire ou sur des sites tests. Cependant les évaluations portant sur des installations grandeur réelle sont encore peu nombreuses et les quelques résultats se sont révélés très variables, et souvent beaucoup moins encourageants que ceux obtenus dans des conditions contrôlées.

L'efficacité des barrières comportementales est spécifique (efficacité fonction de l'espèce et de la taille), et très sensible aux conditions de milieu (turbidité de l'eau, bruit ambiant, hydrodynamique) et à la configuration des sites. En particulier, les conditions hydrauliques dans le canal d'amenée à l'approche de la barrière et la configuration de l'exutoire assurant le transit du poisson à l'aval s'avèrent particulièrement importantes plus encore que pour les barrières physiques.

Il convient donc de rester très prudent dans l'intention d'utiliser des barrières comportementales, d'autant que les fabricants, industriels ou représentants de ce type de matériel ont un intérêt évident dans la vente ou l'utilisation de leur technologie, et peuvent être considérés comme ayant un jugement très subjectif sur le degré d'efficacité et les limites d'utilisation de leur produit.

Figure 5
Schéma de principe (plan et coupe) de la grille déflectrice « MIS » (d'après EPRI, 1994).

Figure 5
Conceptual plan and section views of modular inclined screen (source : EPRI, 1994).

Barrières lumineuses

Les éclairages stroboscopiques semblent présenter un effet répulsif sur le poisson. Plusieurs essais *in situ* de lampes stroboscopiques immergées ont été effectués aux Etats-Unis et au Canada pour éloigner les migrateurs des prises d'eau. Les résultats sont très variables : efficacité acceptable sur certains sites, faible à nulle sur d'autres (EPRI, 1994). Cette technique ne peut pas être considérée comme opérationnelle à l'heure actuelle.

Des résultats encourageants ont été obtenus récemment avec des écrans lumineux répulsifs sur l'anguille adulte en avalaison (HADDERINGH *et al.*, 1992). Ces écrans, constitués de lampes immergées (éclairage continu), utilisent le comportement lucifuge des anguilles pour les détourner vers les zones les plus sombres.

Les salmonidés sont attirés par la lumière, et quelques résultats intéressants ont été obtenus en France en utilisant des lampes à vapeur de mercure de faible puissance (50-80 watts) (LARINIER et BOYER-BERNARD, 1991a, 1991b ; LARINIER et TRAVADE, 1996, 1997 ; GOSSET et TRAVADE, 1999). Les essais ont montré l'intérêt d'un éclairage intermittent pour attirer et maintenir le poisson à proximité d'un exutoire de dévalaison, le poisson passant de préférence immédiatement après l'extinction de la lampe. L'effet de la lumière paraît cependant secondaire par rapport à celui des conditions hydrauliques à l'amont de la prise d'eau : il ne semble pas suffisant pour rendre efficace un exutoire mal implanté. Aux USA, divers tests sur les lampes à vapeur de mercure ont montré des effets variables selon les espèces, avec attraction pour certaines, et répulsion pour d'autres (EPRI, 1994).

Barrières électriques

Divers écrans électriques ont été testés depuis quelques années dans plusieurs pays ; les résultats ont été en général décevants (EPRI, 1986, 1994). Des tests ont été conduits en France, sur la Nive, entre 1995 et 1998. Les résultats se sont avérés assez peu concluants, l'efficacité moyenne étant de l'ordre de 15 % (GOSSET et TRAVADE, 1999).

Barrières acoustiques

Des expérimentations ont été conduites depuis 1987 en Amérique du Nord pour tester l'effet répulsif de sons générés par des transducteurs immergés. Deux systèmes ont été développés et brevetés aux USA, l'un à basse fréquence (< 3KHz) par EESCO (Energy Engineering Services Company), l'autre, ultrasonique, par Sonalysts (« Fish Startle™ »). Les basses fréquences semblent être capables de repousser une large variété d'espèces, alors que les ultrasons sont sélectifs et efficaces essentiellement sur les Clupéidés (EPRI, 1994). D'autres dispositifs à basses fréquences (50 à 1 000 Hz) ont été développés en Grande Bretagne par FGS (Fish Guidance Systems) : le SPA (Sound Projector Array), et le BAFF (Bio-Acoustic Fish Fence) qui utilise à la fois des transducteurs acoustiques et un rideau de bulles. Ces dispositifs étant relativement récents, il n'existe encore à ce jour que très peu d'information sur leur efficacité. Cependant, les expérimentations conduites en France sur les smolts de saumon atlantique aux centrales de Saint Cricq et d'Halsou avec du matériel FGS en 1996 (SPA) et en 1997 (BAFF) se sont traduites par une efficacité quasi nulle, tant vis à vis de leur pouvoir répulsif que de leur capacité de guidage vers un exutoire (TRAVADE *et al.*, 1999 ; GOSSET et TRAVADE, 1999).

Ces résultats peuvent s'expliquer par la faible sensibilité des salmonidés aux fréquences supérieures à 50 Hz, le maximum de sensibilité se situant aux alentours de 10 à 30 Hz, comme l'ont récemment mis en évidence KNUDSEN *et al.* (1994). Des essais sont en cours aux USA pour mettre au point des barrières pour les salmonidés utilisant des infrasons (TAFT *et al.*, 1996).

Murs guideaux de surface

On peut envisager d'assurer le guidage des espèces qui dévalent dans les couches de surface par des murs guideaux disposés en biais dans le canal d'amenée. Ce dispositif a été testé sur la côte Est des USA pour limiter l'entraînement des smolts de saumon atlantique à travers les turbines de la centrale hydroélectrique de Bellows Falls sur la

rivière Connecticut (Figure 6). Le masque vertical est incliné à 40° par rapport à l'axe du canal d'amenée et descend à mi-profondeur. Il guide une partie des poissons vers un canal exutoire. Un second exutoire, situé au niveau des grilles de protection de l'usine, est destiné à récupérer les poissons ayant franchi le mur guideau. L'efficacité du masque lui-même a été évaluée à 84 %, 10 % des smolts empruntent le second exutoire et les 6 % restant transitent dans les turbines (ODEH et ORVIS, 1998). Il est vraisemblable que l'efficacité de ce dispositif est liée à son inclinaison et surtout à la profondeur d'immersion importante du masque (4,5 m).

Figure 6

Vue en plan du mur guideau à l'usine de Bellows Falls (rivière Connecticut).

Figure 6

Layout of guide wall at Bellows Falls powerstation (Connecticut river).

Ecran hydrodynamique

L'écran hydrodynamique (ou « louvers ») est constitué de lames verticales assemblées en un écran incliné par rapport à la direction de l'écoulement (ASCE, 1995) guidant les poissons vers un by-pass. Il a été utilisé sur plusieurs installations, notamment sur la côte Ouest des USA, dans des canaux d'irrigation (avec des débits allant jusqu'à $140 \text{ m}^3/\text{s}$), et, à titre expérimental, sur la côte Est, au niveau de prises d'eau de centrales hydroélectriques. Sur la côte Ouest, ces dispositifs ont été remplacés progressivement par des tambours rotatifs (NIETZEL *et al.*, 1990 ; ASCE, 1995) à la demande de l'Administration qui jugeait leur efficacité insuffisante pour les juvéniles de saumon du Pacifique (60 % à 90 % selon les espèces).

L'angle de l'écran par rapport à l'écoulement est généralement compris entre 10° et 15° (Figure 7). L'écartement des lames varie de 2,5 cm à 15 cm suivant la taille du poisson. Les vitesses d'écoulement à l'approche de l'écran doivent demeurer uniformes et relativement constantes, et sont fonction de la taille et des capacités de nage des espèces concernées (de l'ordre de 0,60 à 1 m/s pour les smolts de saumon atlantique). L'écoulement ne doit pas être ralenti à l'entrée du by-pass, la vitesse dans le by-pass lui-même devant être de l'ordre de 1,5 à 2 fois la vitesse à l'approche de l'écran (RUGGLES, 1980 ; ASCE, 1995).

Figure 7
Caractéristiques d'un écran hydrodynamique à persiennes.

Figure 7
Charasteristics of a louver screen.

Les premiers écrans hydrodynamiques ont été aménagés sur toute la hauteur de l'écoulement, mais récemment des versions de surface ont été expérimentées. Ce type de dispositif a été installé dans le canal d'amenée (40 m de largeur, 6 m de profondeur, débit de 140 m³/s) de la centrale hydroélectrique d'Holyoke sur la rivière Connecticut aux USA. L'écran a été installé sur une profondeur de 2,75 m, soit sur environ la moitié de la profondeur du canal. Il s'agit d'une installation très conséquente, de plus de 120 m de long, supportant des panneaux de persiennes en polyéthylène, associée à un by-pass débitant plus de 4 m³/s. L'efficacité du dispositif est de 86 % pour les juvéniles d'aloses et de 97 % pour les smolts de saumon atlantique (ODEH et ORVIS, 1998). Une version flottante de ce dispositif, testée dans un canal d'amenée à Holyoke, a été installée à la centrale d'Eastman Falls sur la rivière Merrimack (RUGGLES *et al.*, 1993).

Les écrans hydrodynamiques peuvent s'avérer intéressants sur les sites où les conditions hydrauliques sont peu variables en période de dévalaison, et où les vitesses demeurent suffisantes. Ces écrans sont très sensibles au colmatage et nécessitent des dispositifs de nettoyage et des grilles grossières de protection en amont.

Grilles conventionnelles de protection des prises d'eau associées à un exutoire de surface

En France, comme ailleurs, la plupart des aménagements hydroélectriques ont été construits avant que les problèmes liés à la migration de dévalaison aient été perçus.

L'installation de barrières physiques sur ces ouvrages obligerait à redimensionner la plupart des prises d'eau de façon à réduire les vitesses d'écoulement et augmenter les surfaces de filtration.

Devant cette difficulté, on s'est orienté dans un premier temps, pour les juvéniles de saumon et de truite de mer qui migrent dans les couches de surface, vers l'utilisation d'exutoires de surface associés aux grilles existantes. En effet, les grilles de protection des prises d'eau existantes, situées sur la plupart des installations en surface, peuvent se comporter comme des barrières physiques pour les individus de grande taille (adultes en dévalaison), et, dans certaines conditions, comme des barrières comportementales pour les juvéniles, qui éprouvent une certaine répulsion à passer au travers. Cette solution peut être *a fortiori* envisagée dans le cas des prises d'eau situées en profondeur, pour lesquelles on peut raisonnablement penser que l'installation d'un exutoire de surface, convenablement situé et alimenté, peut suffire à assurer un passage efficace vers l'aval des espèces dévalant en surface.

Des expérimentations ont été effectuées en France sur plusieurs sites dans le but de quantifier l'efficacité et dégager les limites de ces dispositifs, ainsi que de définir les critères d'implantation et de dimensionnement des exutoires (LARINIER et TRAVADE, 1996, 1997 ; CHANSEAU *et al.*, 1999 ; CROZE *et al.*, 1999 ; TRAVADE *et al.*, 1999).

Ces études ont montré que le degré d'efficacité de ces dispositifs dépendait étroitement de deux facteurs :

- d'une répulsivité suffisante des grilles de prise d'eau ;

- d'un champ de vitesse à l'amont immédiat des grilles tel qu'il permette le stationnement du poisson un laps de temps suffisant (composante de la vitesse normale aux grilles limitée) à son guidage vers l'une des extrémités du plan de grille, où l'on plantera l'exutoire (existence d'une composante de la vitesse tangentielle au plan de grille marquée).

Le degré de répulsivité de la grille de prise d'eau est fonction de l'espacement des barreaux par rapport à la taille du poisson. Il est généralement accru lorsqu'il existe une composante de la vitesse d'écoulement tangentielle au plan de grille, qui induit un « effet louvers » d'autant plus prononcé que cette composante tangentielle est forte.

Pour les juvéniles de salmonidés, l'espacement inter-barreaux permettant d'arrêter physiquement les poissons est d'environ 1,5 à 2 cm. Une certaine répulsivité des grilles a été observée, lors des différentes expérimentations, pour des espacements variant de 2,5 cm à 4 cm (soit 1/6 à 1/4 de la longueur du poisson). Cet effet répulsif semble ensuite rapidement diminuer lorsque l'espacement entre barreaux augmente : pour des espacements de l'ordre de 6 à 7 cm, la grille devient très perméable aux juvéniles de salmonidés, tout au moins en l'absence d'une composante tangentielle très marquée (BOSC *et al.*, 1997).

Cette composante tangentielle de la vitesse existe quand la prise d'eau est inclinée par rapport à l'axe du canal ; mais elle résulte le plus souvent d'une dissymétrie des conditions d'écoulement à l'approche de la prise d'eau, induite par un changement de direction ou de section du canal d'aménée, qui peut se situer bien en amont de la prise d'eau.

La vitesse maximale permettant un stationnement de durée suffisante des poissons devant les grilles est de l'ordre de 0,40-0,50 m/s pour les smolts de saumon atlantique. Lorsque les conditions hydrauliques devant la prise d'eau sont favorables (guidage très rapide des poissons vers l'exutoire par des courants transversaux), on pourra admettre des vitesses sensiblement plus élevées.

L'expérience montre qu'il existe souvent une zone de recirculation sur l'une des rives en amont immédiat des grilles, dans laquelle les poissons ont tendance à se concentrer : c'est sur cette rive que doit être situé l'exutoire, le plus près possible du plan des grilles. Cette zone de recirculation peut être mise en évidence soit par observation de l'écoulement de surface, le plus souvent caractérisé par une accumulation de corps flottants, soit par la présence (lorsque le canal est vide) de la (ou des) zone(s) de sédimentation à proximité des grilles de prise d'eau.

L'efficacité de l'exutoire dépend non seulement de son implantation et du débit qui y est délivré, mais également des conditions hydrodynamiques, tant à proximité de l'entrée que dans l'exutoire lui-même. La zone d'influence de l'exutoire peut être considérablement réduite par l'existence de courants ascendants susceptibles d'en masquer l'entrée. Il est possible dans certains cas de réduire l'impact de ces ascendances en disposant des grilles de tranquillisation ou des plaques horizontales à l'amont immédiat de l'entrée : sur les sites de Soeix (LARINIER et TRAVADE, 1996) et Camon (CROZE *et al*, 1999) l'amélioration de l'écoulement dans le voisinage immédiat de l'entrée de l'exutoire a permis de faire passer l'efficacité du dispositif de 15-35 % à 60-75 %.

Lorsque la prise d'eau est constituée de plusieurs pertuis d'entrée séparés par des piles, il n'existe plus de courant tangentiel susceptible de guider le poisson sur toute la largeur de la prise d'eau : il convient alors de disposer d'autant d'exutoires de dévalaison que de pertuis.

Les résultats obtenus lors de contrôle de ce type de dispositifs en France font apparaître des efficacités très variables, comprises entre 55-85 % lorsque le guidage est effectif et l'exutoire implanté à proximité de la zone de concentration des poissons, et 10-20 % dans le cas où le guidage du poisson est insuffisant et/ou l'exutoire est mal situé par rapport à la zone de concentration des poissons.

Le principe d'utiliser des exutoires de surface, et plus généralement des ouvrages évacuateurs de surface, a été adopté sur la côte Ouest des USA (rivière Columbia). Cette solution vient en complément des grilles déflectrices installées dans les prises d'eau des turbines situées en profondeur, grilles déflectrices dont l'efficacité est jugée insuffisante sur certains aménagements. Les expérimentations sur plusieurs sites ont montré que l'efficacité des ouvrages de surface pouvait être très variable, et qu'elle semblait liée au rapport débit déversé sur débit total du cours d'eau : en moyenne, 6 % à 10 % du débit total du cours d'eau évacué en surface permettent de faire transiter 80 % des poissons à l'aval (RANSOM et STEIG, 1997 ; FERGUSON *et al*, 1998).

Exutoire et dispositifs de transfert à l'aval

Exutoires

Les exutoires permettent aux poissons de contourner la prise d'eau et de regagner sans dommage l'aval, c'est-à-dire le canal de fuite dans le cas d'une installation hydroélectrique. Ils sont associés à des barrières physiques ou comportementales qui provoquent le guidage ou le rassemblement des poissons à proximité de leur entrée. À travers de toutes les réalisations et expérimentations effectuées, à l'étranger comme en France, il apparaît clairement que l'efficacité d'un exutoire dépend étroitement de la réponse du poisson aux conditions hydrauliques (profondeur de l'écoulement, vitesses, accélération...) engendrées par ses caractéristiques structurelles (implantation, dimensions, forme...) (ASCE, 1995 ; LARINIER et TRAVADE, 1997).

L'entrée de l'exutoire doit être située à proximité de la zone où sont guidés ou rassemblés les poissons, par exemple à l'extrémité aval d'une barrière physique ou comportementale inclinée. C'est en général, pour les juvéniles de salmonidés, une ouverture rectangulaire située en surface dont les dimensions sont fonction du débit à faire

transiter. Ses dimensions minimales (largeur et profondeur) découlent du comportement des poissons qui répugnent à rentrer dans des dispositifs trop étroits ou trop peu profonds. Un minimum de 0,50 m est recommandé pour les deux dimensions.

Les conditions hydrauliques à l'entrée de l'exutoire se révèlent primordiales pour son efficacité. Les observations montrent que lorsque la mise en vitesse de l'écoulement est trop brutale, le poisson éprouve une répulsion certaine à se laisser dévaler. L'accélération à l'entrée de l'exutoire doit être modérée et progressive. Pour ce faire, il est préférable de contrôler le débit, non pas au niveau de l'entrée de l'exutoire, mais à l'aval d'un bassin tampon, ce qui permettra de réduire, et surtout de pouvoir contrôler, la mise en vitesse au niveau de l'entrée (Figure 8). Si l'installation d'un tel bassin n'est pas possible, le contrôle du débit se fera directement à l'entrée de l'exutoire par un seuil épais ou un clapet, préférables à une vanne verticale plate qui induit des gradients de vitesse intenses au niveau de la crête déversante. On cherchera également à éviter les décollements et turbulences à l'entrée des dispositifs en supprimant les angles vifs et en installant éventuellement un entonnement.

Figure 8
Schéma de principe de l'entrée d'un exutoire de dévalaison.

Figure 8
Conceptual plan and section of a downstream bypass entrance.

Le débit dans l'exutoire doit être à l'échelle des débits transitant par la prise d'eau : lors des expérimentations effectuées en France, les débits des exutoires ayant donné de bons résultats varient de 2 % à 10 % environ du débit turbiné. Il doit être ajusté cas par cas à chaque site en fonction des autres paramètres influant sur l'efficacité de l'exutoire (localisation, hydrodynamique, caractéristiques de la grille de prise d'eau...) : plus les autres paramètres sont défavorables et plus il est nécessaire d'augmenter le débit dans l'exutoire. Sur la côte Est des USA, les critères de conception des exutoires sont très voisins de ceux utilisés en France : le débit préconisé est de 2 % du débit turbiné en présence d'une barrière de guidage des poissons vers l'exutoire, et de 5 % du débit turbiné en l'absence de dispositif de guidage (ODEH et ORVIS, 1998). Sur la côte Ouest, les exutoires de surface sont de plus en plus fréquemment utilisés sur les gros ouvrages de la rivière Columbia et de ses affluents. Bien que l'échelle et le type des aménagements soient tout autres, les critères sur les débits préconisés, de l'ordre de 5 % à 10 % du débit turbiné demeurent très proches (FERGUSON *et al*, 1998).

Figure 9
Schéma de l'implantation d'exutoires de dévalaison au niveau d'une usine hydroélectrique.

Figure 9
Conceptual plan of location of downstream bypasses at hydroelectric plant intakes.

Le principe d'implantation des exutoires au niveau des prises d'eau est schématisé sur les Figures 9 et 10. Lorsque le plan de grille est très incliné par rapport à l'axe du canal, l'exutoire sera implanté à l'extrémité aval (Figure 9a). Dans le cas d'un écoulement très dissymétrique, l'exutoire sera installé dans la zone de recirculation où viennent s'accumuler les poissons (Figure 9b). En l'absence de dissymétrie nette de l'écoulement, ou d'écoulement instable, il sera préférable d'installer deux exutoires (Figures 9c et 9d). Lorsque la prise d'eau est située en profondeur, il sera possible d'installer une galerie collectrice équipée de plusieurs entrées (Figure 10a). Si le plan de filtration possède une forte inclinaison par rapport à la verticale, l'exutoire sera aménagé dans la partie supérieure de ce plan de filtration (Figure 10b).

Figure 10
Schéma de l'implantation d'exutoires de dévalaison au niveau d'une usine hydroélectrique.

Figure 10
Conceptual plan and section of location of downstream bypasses at hydroelectric plant intakes.

Au-delà d'une certaine largeur de prise d'eau ou lorsque les conditions hydrauliques en amont de la prise d'eau ne conduisent pas à concentrer les migrateurs dans une zone déterminée, il est nécessaire d'implanter plusieurs exutoires.

Le colmatage par les corps dérivants est le principal problème rencontré lors du fonctionnement de ces exutoires dans la mesure où les zones de rassemblement des poissons - et par conséquent la position des exutoires - correspondent généralement à des zones d'accumulation des débris. Pour s'en affranchir, il suffit de dimensionner les ouvrages de façon à permettre le passage à l'aval des corps dérivants ; à défaut, il conviendra d'installer à l'amont de l'exutoire des grilles à barreaux à fort écartement (minimum 20 cm), de façon à perturber le moins possible le comportement des poissons.

Transfert des poissons à l'aval

Après passage dans l'exutoire, les poissons doivent être transférés à l'aval de l'aménagement. Le principe est de restituer le poisson par l'intermédiaire d'une conduite ou d'un canal à surface libre qui contourne la centrale et se jette dans le canal de fuite. Les canaux à surface libre sont préférables dans la mesure où ils sont moins sujets aux obstructions et d'un entretien plus facile. Conduites ou canaux peuvent être de formes et de sections très variables selon la configuration des sites et les débits à transiter. Les surfaces intérieures et les raccords doivent être lisses pour éviter l'écaillage des poissons. Les dimensions et les rayons de courbure des coudes doivent être suffisants pour limiter les risques de colmatage par les débris. Les vitesses dans l'ouvrage et au point d'impact dans le bief aval doivent rester inférieures à une dizaine de m/s, certains organismes préconisant même de ne pas dépasser 7 à 8 m/s (ASCE, 1995). La hauteur maximale du débouché de la conduite ou du canal au-dessus du plan d'eau ne devra pas dépasser 4 à 5 m et le rejet se fera dans une zone d'une profondeur d'eau suffisante pour éviter tout risque de blessure par choc mécanique.

On aura intérêt à assurer une dispersion du jet en sortie d'ouvrage pour limiter les cisaillements et la pénétration du jet trop profondément dans le bassin de dissipation aval. Il conviendra aussi d'éviter de rejeter les poissons dans une zone d'eau morte ou à trop faible vitesse, dans laquelle les prédateurs sont susceptibles de se concentrer.

Lorsque le débit dans l'exutoire est important (plusieurs m³/s), il est possible de concentrer les poissons dans un plus faible débit à l'aide d'une grille inclinée qui évacue latéralement ou par en-dessous une partie du débit. Ceci permet de limiter les sections de l'ouvrage d'évacuation des poissons et de récupérer éventuellement une partie du débit d'attrait qui peut être recyclé par pompage (ASCE, 1995). Les grilles inclinées sont en général des grilles à barreaux (les grilles à fil soudé, de type « Johnson », plus lisses, sont préférables), le clair entre barreaux dépendant des espèces considérées : pour les smolts de saumon atlantique, on choisira des écartements des barreaux inférieurs ou égaux à 1 cm et une porosité de grille inférieure à 50 %.

Dispositifs de capture et de transport des poissons

Dans certains cas, il est soit impossible de restituer les poissons à l'aval immédiat de l'ouvrage, soit nécessaire de contourner plusieurs obstacles en cascade. On procède alors à la capture et au transport des poissons (par camion ou barges) à l'aval. L'opération consiste à piéger les poissons dans une enceinte de stabulation dont le volume et l'alimentation en eau sont compatibles avec la fréquence des transports (en général une à deux fois par jour). Le principe de fonctionnement du piège est en général basé sur le tri des poissons à l'aide d'une grille inclinée filtrant le débit de l'exutoire (de façon analogue à une prise d'eau du type « par en-dessous »), et dirigeant le poisson vers l'enceinte de stabulation à l'aide d'une goulotte située en extrémité de grille. Le volume de stabulation

doit être déterminé à partir de la quantité maximale instantanée de poissons susceptible d'être présente dans le piège en prenant un volume de 30 l/kg de poisson stabulé (soit 35 kg de poisson/m³). Le débit d'alimentation en eau de l'enceinte de stabulation doit permettre un à deux renouvellements du volume du bassin toutes les heures. La capacité de la cuve de transport est déterminée sur la base de 15 l/kg de poisson transporté (soit 70 kg de poisson/m³) pour des smolts de saumon et pour des durées de transport n'excédant pas quelques heures (BELL, 1986 ; ASCE, 1995).

Possibilités de passage dans les turbines et les ouvrages évacuateurs de surface

Sur la plupart des microcentrales, les techniques actuelles, que ce soit barrières physiques ou exutoires de surface associés aux grilles existantes, peuvent permettre de réduire significativement les dommages sur les juvéniles et les adultes de salmonidés, au prix de modifications quelquefois importantes des ouvrages existants. L'intérêt de l'installation de tels dispositifs ne peut être discuté. Sur certains gros ouvrages de basse chute situés sur la partie inférieure des grands cours d'eau, il peut s'avérer, dans l'état actuel de la technique, très difficile de détourner des turbines une proportion importante des juvéniles en dévalaison, sans remettre en question la conception même des prises d'eau existantes. C'est par ailleurs sur ce type d'ouvrage que les mortalités potentielles sont généralement les plus faibles. On favorisera dans la mesure du possible le passage du poisson dans tout exutoire de surface situé à proximité de la prise d'eau (ouvrage spécifique, vannes d'évacuation des détritiques ou des glaces, clapets évacuateurs de surface...), sachant que l'efficacité risque d'être limitée, sauf si la prise d'eau des turbines est située en profondeur. De plus, lorsqu'il existe plusieurs turbines de caractéristiques différentes, on utilisera dans la mesure du possible en période de dévalaison celles présentant le moins de risques potentiels.

Espèces autres que les salmonidés

Les problèmes de dévalaison ont été très peu abordés pour les espèces autres que les salmonidés.

Pour les juvéniles d'aloise, dont le comportement migratoire semble voisin de celui des salmonidés (dévalaison dans les couches de surface), on peut penser que les dispositifs destinés à ces derniers devraient se montrer efficaces, sous réserve d'en adapter les critères de dimensionnement, pour prendre en compte les tailles et les capacités de nage plus faibles des individus. Par ailleurs, en France, cette espèce est le plus souvent concernée par des aménagements de basse chute équipés de roues tournant à faible vitesse et induisant des mortalités faibles à modérées (inférieures à 5 %). Sur un axe donné, lorsque le nombre d'ouvrages en série sur le secteur fréquenté par cette espèce est limité (peu de mortalités cumulées), il est probable que le passage des poissons dans les turbines n'engendre pas de mortalités susceptibles de mettre en danger les populations. Par conséquent, dans l'état actuel de la technique, l'équipement de ces usines en ouvrages de dévalaison pour l'aloise ne semble pas prioritaire, et devra être envisagé à moyen ou long terme au vu de l'évolution des technologies.

Pour l'anguille, aucune solution spécifique n'a été mise en œuvre en France du fait de la prise en compte relativement récente de sa migration. Seules les barrières physiques sont susceptibles d'être opérationnelles, mais leur installation obligerait de redimensionner la plupart des prises d'eau (augmentation de la surface du plan de filtration associée à la réduction de l'espacement entre barreaux). Du fait du comportement propre à l'espèce, il n'est pas certain que la solution des exutoires de surface associés aux grilles de prises d'eau se révèle efficace. Des expérimentations sur des exutoires de fond sont à entreprendre, mais si cette technique s'avérait efficace, il serait à craindre qu'elle pose de gros problèmes

d'exploitation sur certains sites. Le principe des barrières comportementales lumineuses semble prometteur, compte tenu du caractère lucifuge de l'espèce (HADDERINGH *et al.*, 1992). L'arrêt du turbinage en période de dévalaison a été envisagé, de même que la capture des individus en amont des aménagements pour d'autres espèces d'anguilles : *Anguilla rostrata* aux USA (EUSTON *et al.*, 1998) et *Anguilla dieffenbachii* en Nouvelle-Zélande (MITCHELL, 1995). Ces solutions supposent cependant que la période de dévalaison soit d'une part prévisible, et d'autre part suffisamment brève, ce qui ne semble pas être le cas de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) si l'on considère certains suivis de piège d'avalaison (FOURNEL et EUZENAT, 1979).

Pour la truite, des solutions voisines de celles utilisées pour le saumon atlantique et la truite de mer peuvent être envisagées. Cependant, les critères sur l'espacement des barreaux et sur les vitesses à l'amont du plan de grilles doivent être adaptés à la distribution des tailles beaucoup plus étendue des individus.

Pour les autres espèces telles que les cyprinidés, ésofidés, percidés, on ne dispose que de peu d'informations, tant sur les caractéristiques des migrations (périodes, tailles...) que sur le comportement de migration. On sait cependant que les jeunes stades de cyprinidés (tailles de quelques cm) sont susceptibles de dévaler en grand nombre lors de leur redistribution dans la rivière, en particulier en été (SOLOMON, 1992). Sur les aménagements existants, il est difficile de proposer des barrières physiques, qui imposeraient des espacements de grilles réduits (de l'ordre de quelques mm), et surtout des vitesses d'approches très faibles (de l'ordre de 10 à 15 cm/s), généralement incompatibles avec les structures en place. Dans l'état actuel de la technique, on ne peut proposer que des exutoires de surface, dont l'efficacité reste à démontrer. Sur les installations de basses chutes, on peut par ailleurs se poser la question de l'utilité d'un dispositif de dévalaison, dans la mesure où les mortalités dans les turbines sont faibles et que les déplacements de ces espèces se faisant sur des distances limitées, elles ne sont concernées, contrairement aux grands migrateurs, que par un nombre réduit d'aménagements. Il conviendrait de procéder à la quantification de l'entraînement, en nombre, en taille et en espèce, sachant que ce phénomène d'entraînement et son impact sont certainement infiniment variables d'un site à l'autre. Lors des rares études portant sur le sujet, il n'a jamais été observé à ce jour d'entraînements et de dommages associés considérés comme étant susceptibles de mettre en péril l'équilibre des populations (EPRI 1994 ; SORENSON *et al.*, 1998).

CONCLUSION

On a passé en revue les différentes techniques permettant de réduire l'impact des aménagements hydroélectriques sur la migration de dévalaison. Les barrières physiques apparaissent actuellement comme les techniques les plus efficaces. Les exutoires de surface et les écrans hydrodynamiques ont leur limites. Les autres barrières comportementales, étant donné leur niveau de fiabilité insuffisant, ne peuvent être considérées que comme des solutions expérimentales.

Avec la prise en compte des impacts liés à la dévalaison, il est à prévoir l'émergence de contraintes environnementales (vitesses dans les canaux d'amenée surface, orientation et espacement des grilles de prises d'eau...) beaucoup plus fortes sur les aménagements hydroélectriques faisant l'objet de renouvellement de concession ou d'autorisation, de même que sur les nouvelles prises d'eau, si tant est que l'on puisse accepter raisonnablement le principe d'aménagements nouveaux sur un cours d'eau en phase de restauration.

Si l'on veut espérer trouver des solutions efficaces et moins contraignantes pour l'exploitant que les barrières physiques, il est évident que cela passera par des efforts beaucoup plus importants de recherche et développement que ce qui est fait actuellement en France. Tous les progrès dans le domaine passeront obligatoirement par l'acquisition d'une meilleure connaissance du comportement du poisson, de façon à pouvoir prévoir la manière dont il réagit face aux stimuli environnementaux, en particulier aux conditions hydrodynamiques dans les canaux d'aménée. Les techniques comme la télémétrie (radio ou acoustique), l'hydro-acoustique, ainsi que la vidéo sont des outils relativement performants qui permettent de suivre de façon satisfaisante le comportement du poisson au niveau d'une prise d'eau.

Il est en de même pour les prises d'eau, dont la conception devrait prendre en compte le problème de la dévalaison (exemple des grilles MIS). Parallèlement, il conviendrait de réduire les dommages des poissons lors de leur transit par les turbines : les mortalités dans les turbines ne sont pas une fatalité, en particulier sur les aménagements de basse chute. Des études sont d'ailleurs en cours aux USA pour adapter la conception des turbines au passage des poissons (OTA, 1995 ; CADA, 1997).

Il paraît enfin important d'évaluer non seulement les solutions existantes au niveau d'aménagements particuliers, mais aussi d'évaluer l'impact global d'une série d'aménagements sur un axe donné pour pouvoir déterminer les seuils d'efficacité à imposer au niveau de chaque aménagement.

BIBLIOGRAPHIE

- AITKEN P.L., DICKERSON L.H., MENZIES W.J.M., 1966. Fish passes and screens at water power works. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 35, 29-57.
- ASCE, 1995. Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants. ASCE, New-York, 447 p.
- BELL M.C., 1981. Updated compendium of the success of passages of small fish through turbines. *Fish. Eng. Res. Prog.*, U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 294 p.
- BELL M.C., 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 290 p.
- BELL M.C., DELACY A.C., 1972. A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits. *Fish. Eng. Res. Prog.*, U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 121 p.
- BOSC S., CHANSEAU M., CROZE O., DE FAVERI N., LARINIER M., TRAVADE F., 1997. Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les juvéniles de saumon atlantique. Usine hydroélectrique de Baigts (gave de Pau). Rapport GHAAPE RA 97.08, 23 p.
- CHANSEAU M., LARINIER M., TRAVADE F., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le gave d'Aspe étudiés par le technique de marquage-recapture et par radiotélémétrie. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 353/354, 99-120.
- CLAY C.H., 1961. Design of fishways and other fish facilities Dept. of Fisheries, Ottawa. Canada, 301 p.
- CLAY C.H., 1995. Design of fishways and other fish facilities (second edition). CRC Press., 248 p.

- CROZE O., CHANSEAU M., LARINIER M., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 353/354, 121-140.
- DESROCHERS D., 1994. Suivi de la migration de l'anguille d'Amérique au complexe Beauharnois. Vice présidence Environnement, Hydro-Québec, 107 p.
- EICHER G.J., 1985. Fish passage : protection of downstream migrants. *Hydro Review*, 4, 95-100.
- EICHER, 1987. Turbine-related fish mortality : review and evaluation of studies. Rapport AP-5480, EPRI, Palo Alto, Californie, 102 p.
- EPRI, 1986. Assessment of downstream migrant fish protection technology of hydroelectric application. Stone and Webster Eng. Corp., Boston, Massachussets, 420 p.
- EPRI, 1992. Fish entrainment and turbine mortality review and guidelines. Stone and Webster Eng. Corp., Boston, Massachussets, 225 p.
- EPRI, 1994. Research update on fish protection technologies for water intakes. Stone and Webster Eng. Corp., Boston, Massachussets, 225 p.
- EUSTON E.T., ROYER D., SIMONS C., 1998. American eels and hydro plants : clues to eel passage. *Hydro Review*, 17(4), 94-103.
- FERGUSON J.W., 1992. Analysing turbine bypass systems at hydro facilities. *Hydro Review*, 11(3), 46-56.
- FERGUSON J.W., POE T.P., CARLSON T.J., 1998. The design, development, and evaluation of surface oriented juvenile salmonid bypass systems on the Columbia River, USA. In : JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S. and WEISS S. (Eds.), Fish migration and fish bypasses, Fishing New Books, 281-299.
- FOURNEL F., EUZENAT G., 1979. Etude des salmonidés migrateurs du bassin de l'Arques (Seine Maritime). Rapport Ministère de l'Environnement-Conseil Supérieur de la Pêche, 50 p.
- GOSSET C., TRAVADE F., 1999. Etude de dispositifs d'aide à la migration de dévalaison : barrières comportementales. Journée annuelle de la Société Française d'Ichtyologie. *Cybiurn*, special issue, (in press).
- HADDERINGH R.H., VAN DER STOEP J.W., HAGRAKEN J.M., 1992. Deflecting eels from water inlets of power stations with light. *Irish Fish. Invest.*, 36, 37-41.
- HADDERINGH R.H., BAKKER H.D., 1998. Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers. In : JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S. and WEISS S. (Eds.), Fish migration and fish bypasses, Fishing New Books, 315-328. ISBN 0-85238-253-1.
- HEYSEY P.G., MATHUR D., D'ALLESANDRO L., 1993. A new technique for assessing fish passage survival at hydro power stations. In : WILLIAMS U.P., SCRUTON D.A. et al. (Eds.), Proc. Workshop 1991 on Fish passage at hydroelectric developments *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, 1905, St John's, Newfoundland, 32-38.
- KNUDSEN F.R., ENGER P.S., SAND O., 1994. Avoidance responses to low frequency sounds in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar*. *J. Fish Biol.* 45, 227-233.
- LARINIER M., DARTIGUELONGUE J., 1989. La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 312-313, 1-90.
- LARINIER M., BOYER-BERNARD S., 1991a. Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 321, 30-51.

- LARINIER M., BOYER-BERNARD S., 1991b. La dévalaison des smolts de saumon atlantique au barrage de Poutès sur l'Allier : utilisation de lampes à vapeur de mercure en vue d'optimiser l'efficacité de l'exutoire de dévalaison. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 323, 129-148.
- LARINIER M., TRAVADE F., 1996. Smolt behavior and downstream fish bypass efficiency at small hydroelectric plants in France. Association Internationale de Recherches Hydrauliques, 2^{ème} Symposium international sur l'hydraulique et les habitats, Ecohydraulique 2000, Québec, vol B, 891-902.
- LARINIER M., TRAVADE F., 1997. The development and evaluation of downstream bypasses for juveniles salmonides at small hydroelectric plants in France. Am. Fish Soc. 127th Annual Meeting - Monterey, California, August 24-28 1997, 18 p.
- MITCHELL C.P., 1995. Fish passage problems in New Zealand. Proc. Int. Symp. on fishways 95', Gifu, Japan, 33-41.
- MONTEN E., 1985. Fish and turbines. Fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm, 111 p.
- MONTREAL ENGINEERING COMPANY, 1981. Fish mortality as a function of the hydraulic properties of turbines. Can. Electr. Assoc., Res. and Dev., Rep. G-144, 75 p.
- NIETZEL D.A., CLUNET T.J., ABERNETHY C.S., 1990. Evaluation of rotary drum screens used to project juvenile salmonids in the Yakima River basin, Washington, USA, Proc. Int. Symp. on fishways 90', Gifu, Japan, 523-529.
- ODEH M., ORVIS C., 1998. Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North-east USA. In : JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S. and WEISS S. (Eds.), Fish migration and fish bypasses, Fishing News Books, 267-280.
- OTA (Office of Technology Assessment), U.S. Congress, 1995. Fish passage technologies : protection at hydroelectric facilities, OTA-ENV-641, Washington, DC ; U.S. Government Printing Office, 167 p.
- RAINEY W.S., 1990. Cylindrical drum screens designs for juvenile fish protection at two large diversions. Proc. Int. Symp. on fishways 90', Gifu, Japan, 143-150.
- RANSON B.H., STEIG T.W., 1997. Surface or deep spill : which salmon bypass works better ? *Hydro Review*, 16(1), 54-65.
- RASMUSSEN G., AARESTRUP K., JEPSEN N., 1996. Mortality of sea trout (*Salmo trutta*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts during seaward migration through river and lakes in Denmark. Rep. ICES C.M. Anacat Fish Committee. C.M. 1996/T : 9, 14 p.
- RUGGLES C.P., 1980. A review of the downstream migration of Atlantic salmon. Freshwater and Anadromous Div., Resource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, *Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci.*, 952, 39 p.
- RUGGLES C.P., 1992. What's new in downstream fish passage ? In : MILLS D., Salmon in the Sea and New Enhancement Strategies. Fourth International Atlantic Salmon Symposium. Fishing News Books, Blackwell Science Ltd, Oxford, UK., 402-416.
- RUGGLES C.P., MURRAY D.G., 1983. A review of fish response to spillways. Freshwater and Anadromous Div., Resource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, *Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci.*, 1172, 30 p.
- RUGGLES C.P., ROBINSON D.A., STIRA R.J., 1993. The use of floating louvers for guiding Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts from hydroelectric turbine intake. Proceedings of the workshop on fish passage at hydroelectric developments. *Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci.*, 1905, 87-94.
- SOLOMON D.J., 1992. Diversion and entrapment of fish at water intakes and outfalls. National Rivers Authority, rapport R&D-1, 51 p.

- SORENSEN K.M., FISHER W.L., ZALE A.V., 1998. Turbine passage of juvenile and adult fish at a warmwater hydroelectric facility in northeast Oklahoma : monitoring associated with relicensing. *N. Am. J. Fish. Manage.*, 18, 124-136.
- TAFT E.P., WINCHELL F.C., COOK T.T., SULLIVAN C.W., 1992. Introducing a modular approach to fish screen installation. *Hydro Review*, 11(7), 95-102.
- TAFT E.P., AMARAL S.V., WINCHELL F.C., SULLIVAN C.W., 1993. Biological evaluation of a new modular fish diversion screen. Proc. Symp. Fish passage policy and technology, Portland, Oregon, USA, sept.1993, 177-186.
- TAFT E.P., BROWN N.A., COOK T.C., RONAFALVY J.P., HABERLAND M.W., 1996. Development in the use of infrasound for protecting fish at water intakes. Proceedings of the ASCE session on « Fish Bypass Systems », North American Water and Environment Congress '96, june 22-28, Anaheim, California, 6 p.
- TAYLOR R.E., KYNARD B., 1985. Mortality of juvenile american shad and blueback herring passed through a low-head Kaplan Hydro-electric turbine. *Tran. Am. Fish. Soc.*, 114, 430-435.
- TRAVADE F., GOUYOU C., DE FAVERI N., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de Saint Cricq sur le gave d'Aspe. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 353/354, 157-180.
- TURNER A.R., FERGUSON J.W., BARILA T.Y., LINDGREN M.F., 1993. Development and refinement of turbine intake screen technology on the Columbia River. Fish passage policy and technology. Proceeding of the symposium American Fisheries Society, Portland, Oregon, 123-128.
- WILLIAMS J.G., 1990. Water velocity in relation to fish behavior in the design of screens for diversion of juvenile salmonids from turbines at hydroelectric dams on the Columbia River, USA. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan, 137-142.
- WINCHELL F.C., TAFT E.P., COOK T., 1993. EPRI's evaluation of the Elwa Dam Eicher Screen and subsequent design changes and hydraulic tests. Proc. Symp. Fish passage policy and technology, Portland, Oregon, USA, sept.1993, 189-196.

Photo 1
Grilles fines sur une prise d'eau en Ecosse.

Photo 1
Fine fixed mesh screens on a water intake in Scotland.

Photo 2
Ecran électrique expérimental à l'usine d'Halsou sur la Nive.

Photo 2
Experimental electrical screen at Halsou power station on the Nive river.

Photo 3
Ecran hydrodynamique d'Holyoke (rivière Connecticut).

Photo 3
Louver screen at Holyoke (Connecticut river).

Photo 4
Exutoires de dévalaison situés au-dessus des turbines de l'usine de West-Enfield (Maine, USA).

Photo 4
Downstream bypasses situated above the turbine water intake at West Enfield power station (Maine, USA).

Photo 5

Exutoire de dévalaison au barrage de Poutès sur l'Allier.

Photo 5

Downstream bypass at the water intake of Poutès dam on the Allier river.

Photo 6

Exutoire de dévalaison à l'usine d'Halsou sur la Nive

Photo 6

Downstream bypass at Halsou power station on the Nive river

Photo 7

Exutoire de dévalaison de l'usine de Soeix sur le gave d'Aspe.

Photo 7

Downstream bypass at Soeix power station on the Gave d'Aspe river.