LA DÉVALAISON DES SMOLTS DE SAUMON ATLANTIQUE AU BARRAGE DE POUTÈS SUR L'ALLIER (43) : UTILISATION DE LAMPES A VAPEUR DE MERCURE EN VUE D'OPTIMISER L'EFFICACITÉ DE L'EXUTOIRE DE DÉVALAISON

M. LARINIER et Sylvie BOYER-BERNARD

CSP - CEMAGREF, BP 26, 31321 CASTANET-TOLOSAN Cedex

Reçu le 16 décembre 1991

Accepté le 5 février 1992

Received 16 December, 1991

Accepted 5 February, 1992

RÉSUMÉ

La dévalaison des smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) au barrage de Poutès (43) a été suivie en 1989 afin de tester l'influence de la lumière à vapeur de mercure sur le comportement de dévalaison à travers un exutoire de surface destiné à éviter le transit des poissons par les turbines. Les rythmes d'activité quotidienne, nycthémerale et horaire ont été relevés à l'aide d'enregistrement vidéo. L'activité de dévalaison est essentiellement nocturne, sauf en fin de migration où l'on observe un renversement de tendance. Les observations montrent que si l'effet de la lumière est indubitable, le phénomène est complexe car il dépend de l'intensité des lampes, de la durée de l'éclairage et de la situation des lampes par rapport à la zone où l'on désire concentrer le poisson. L'analyse des résultats met en évidence que l'éclairage de l'exutoire augmente significativement les passages des smolts, mais que l'effet n'est pas immédiat : une quinzaine de minutes sont nécessaires pour attirer le poisson dans le clapet, le maximum de passage étant observé au bout d'une demi-heure. De trois à huit fois plus de smolts ont emprunté l'exutoire lorsque les lampes étaient allumées.

SMOLTS DOWNSTREAM MIGRATION AT POUTÈS DAM ON THE ALLIER RIVER : USE OF MERCURY LIGHTS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A FISH BYPASS STRUCTURE

SUMMARY

Downstream migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts was studied in 1989 at Poutès dam on the Allier river to evaluate the effectiveness of mercury lights in modifying behavioral responses of smolts at a fish bypass structure. Daily and hourly passage of smolts was accessed by video recording. Migratory activity was mainly nocturnal, diurnal movements increasing at the end of emigration period. Analysis of results showed that the lights significantly increased the rate of passage. Visual observation showed that illumination duration, light location and intensity may be important parameters in effective application of mercury lights for attraction. The effect of lights was not immediate : the maximum passage rate was observed more than half an hour following the activation of lights. Three to eight times as many fish were bypassed with the lights on than with the lights off.

1. INTRODUCTION

Cette étude fait suite à celle effectuée en 1987 et 1988 à la centrale hydroélectrique d'Halsou sur la Nive (LARINIER et BOYER-BERNARD, 1991) qui avait mis en évidence l'importance du débit sur l'efficacité d'un clapet de dévalaison et lors de laquelle avait été testée, à titre exploratoire, l'influence de la lumière sur le comportement de dévalaison nocturne des smolts.

Les expérimentations entreprises au barrage de Poutès au printemps 1989 (BOYER-BERNARD et LARINIER, 1991) avaient pour objet de poursuivre les études de l'influence de la lumière (lampes à vapeur de mercure) sur le comportement de dévalaison nocturne des smolts, tout en réalisant parallèlement le suivi de l'activité de migration des smolts en fonction des différents paramètres du milieu.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Site d'expérimentation

2.1.1. L'aménagement hydro-électrique de Poutès-Monistrol

L'aménagement de Poutès-Monistrol est situé sur l'Allier, affluent rive gauche de la Loire, à 900 km de l'Océan Atlantique ; il se compose du barrage-poids de Poutès qui dérive les eaux de l'Allier par une galerie souterraine vers la centrale hydroélectrique implantée à Monistrol.

La partie de la rivière court-circuitée comprise entre le barrage et la centrale, alimentée hors période de déversement au barrage par le débit réservé (0.5 m³/s), est longue de 9 km (Fig. 1).

Figure 1 : Situation et schéma de l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol.

Figure 1 : Geographic location and site plan of Poutès-Monistrol hydroelectric facilities.

Le barrage de Poutès est un barrage de 70 m de long et 17.7 m de haut équipé de trois vannes secteurs de 14 m x 6.2 m pouvant évacuer 1500 m³/s à la cote de retenue normale 650.20 NGF (Fig. 2).

La prise d'eau (Fig. 2) située en rive gauche à 10 m sous le niveau moyen de la retenue alimente, sous 61.5 m de chute nette, par l'intermédiaire d'une galerie de 3.2 km de longueur puis d'une conduite forcée de 80 m de longueur, deux turbines FRANCIS. Ces turbines situées à la centrale de Monistrol d'Allier ont un débit nominal unitaire voisin de 16 m³/s, la puissance installée est de 17 MW.

Le régime des eaux de l'Allier au niveau de l'aménagement de Poutès-Monistrol est de type pluvio-nival : il se caractérise par de hautes eaux en hiver et au début du printemps et par des basses eaux de juillet à octobre. Le module interannuel est voisin de 17 m³/s, les débits moyens mensuels varient de 3-5 m³/s aux mois d'août et septembre à une trentaine de m³/s en février, mars et avril. Les débits mensuels moyens des mois correspondant à la période de dévalaison des smolts (mars, avril et mai) sont respectivement de 32 m³/s, 28 m³/s et 19 m³/s.

Figure 2 : Vue du barrage et de la prise d'eau de Poutès.

Figure 2 : View of Poutès dam and water intake.

2.1.2. Le dispositif de dévalaison

Dans la culée rive gauche du barrage se trouve un exutoire de surface destiné à assurer la dévalaison des juvéniles ; il a été installé en 1987 dans un canal existant, destiné à l'origine à l'évacuation des glaces, d'une trentaine de mètres de longueur, d'une largeur de 2.5 m, de pente 65 %, alimenté par une vanne plate motorisée fonctionnant en surverse et débouchant au pied du barrage. Des expériences menées en 1983 et 1984 ont montré que cette passe, moyennant certaines modifications et une gestion appropriée, pouvait être empruntée de façon significative par les juvéniles lors de leur descente vers la mer (GUIVARCH, 1984 ; BOMASSI et TRAVADE, 1985).

Une étude sur modèle a été effectuée au Laboratoire National d'Hydraulique (CLIQUE et TRAVADE, 1986) dans le but de mettre au point et d'installer un dispositif assurant le meilleur compromis entre dévalaison des juvéniles et évacuation des corps flottants.

Le dispositif actuel de dévalaison se compose de l'amont vers l'aval d'un entonnement, d'une grille de tri et d'une buse assurant le transit des poissons au pied du barrage (Fig. 3).

Figure 3 : Schéma de principe du dispositif de dévalaison (plan et coupe).

Figure 3 : Plan and section view of downstream bypass facilities.

L'entonnement (largeur amont : 3.60 m, largeur aval : 2.30 m, longueur totale : 2.40 m, hauteur : 0.60 m) installé en 1984 par E.D.F. est disposé sur la vanne d'alimentation du canal, de façon à augmenter les courants de surface et l'attractivité de la glissière. Ce dispositif permet une mise en vitesse progressive de l'écoulement en réduisant les phénomènes de décollement et les turbulences grâce à son profil elliptique. Peint en blanc pour permettre une meilleure visualisation des poissons, l'entonnement capte l'eau dans la retenue pour la déverser sur la grille de tri.

Cette grille de tri de 3.20 m de longueur sur 2.40 m de largeur et d'un clair de 5 cm est destinée à séparer les smolts des corps flottants. Sous cette grille, une goulotte en forme d'entonnoir collecte l'eau et les poissons en direction d'une buse de 30 m de long et de 0.40 m de diamètre qui débouche au pied du barrage. Les corps dérivants de grosses dimensions restent au dessus de la grille et peuvent être évacués par l'ancienne glissière "à glaçons et à tacons" de 2.5 m de largeur.

La cote de l'entonnement est asservie au niveau de la retenue de façon à y respecter un débit et un champ de vitesse constant.

Photo 1 : Prise d'eau et exutoire de dévalaison au barrage de Poutès.

Photo 1 : A view of the water intake and the downstream fish passage facilities at Poutès dam.

2.2. Suivi de l'activité de dévalaison

Les expérimentations menées sur le site de Poutès en 1989 ont débuté le 29 mars et se sont prolongées jusqu'au 9 juin, c'est-à-dire sur 72 jours.

Le suivi de l'activité de dévalaison a été assuré par un système vidéo de surveillance (caméra vidéo 50 Philips, magnétoscope PANASONIC NV 8051 à vitesse d'enregistrement variable). Les enregistrements ont été réalisés en continu 24 heures sur 24 pendant toute la durée de la campagne avec des durées d'enregistrement de douze heures par bande (bande de 180 minutes), ce qui correspond à une vitesse ralentie d'un facteur 4 et à une prise d'environ 6 images par seconde. Cette surveillance permanente permettait la comptabilisation des smolts et des autres Oespèces dévalant ainsi que l'observation de leur comportement au niveau de l'entonnement.

Photo 2 : Entrée de l'exutoire de dévalaison (vue de l'amont).
Photo 2 : A view of the fish bypass entrance looking downstream.

Photo 3 : Exutoire de dévalaison (vue de l'aval).
Photo 3 : A view of the fish bypass looking upstream.

Photo 4 : Vue de l'arrivée de la conduite d'évacuation des poissons et du canal d'évacuation des glaces et des débris.

Photo 4 : View of the fish pipe discharge and the ice and trash chute.

2.3. Les paramètres du milieu

La température de l'eau a été relevée en continu pendant toute la campagne à l'aide d'un thermographe dont la sonde a été placée à 0.50 m au-dessous de la surface de l'eau. L'oxygène dissous et le pH de l'eau ont été contrôlés une fois par jour. L'oxygène a été dosé par procédé chimique et le pH par méthode colorimétrique. Conductivité et transparence de l'eau (mesurée au disque de Secchi) ont fait l'objet de 3 relevés journaliers.

Les débits de l'Allier et les débits turbinés ainsi que les cotes amont ont été fournis par l'usine E.D.F. de Monistrol.

Pression atmosphérique, précipitations, température de l'air et insolation ont été obtenues auprès de la station météorologique de Chaspuzac (Loudes).

2.4. Lumière et activité de dévalaison nocturne

Au niveau de l'exutoire de dévalaison, plusieurs lampes de puissances différentes ont été installées (Fig. 2) : deux lampes à vapeur de mercure de 400 W et 125 W ont été orientées de manière à pouvoir éclairer la zone située en amont de l'entonnement sans toutefois éclairer le plan de grille de la prise d'eau des turbines ; une lampe à vapeur de mercure de 80 W a été fixée juste à l'aplomb de l'exutoire de façon à n'éclairer que l'entonnement. Ces deux éclairages seront respectivement dénommés dans la suite du texte éclairages "amont" et "entonnement".

Trois projecteurs à infrarouge (ADT security system, longueur d'onde 780 nm) d'une puissance de 500 W ont été utilisés afin de permettre l'enregistrement vidéo des passages nocturnes au niveau de l'exutoire en l'absence d'éclairage par les lampes à vapeur de mercure. Deux d'entre eux, fixés sur un timon au niveau de l'entonnement, éclairaient ce dernier de l'amont vers l'aval, le troisième situé à l'aval de la grille de tri éclairait l'entonnement en sens inverse. Le tout assurait une excellente image vidéo en l'absence d'éclairage visible. D'après

plusieurs auteurs, le comportement du poisson ne serait pas affecté par un éclairage se situant dans l'infrarouge proche (BEACH, 1978 ; PROTASOV, 1970). Les lampes à vapeur de mercure utilisées sont des lampes à haute pression (HPL-N) à ballon fluorescent produisant de la lumière avec des pics d'émission proches de 400 nm, 430 nm (violet), 540 nm-560 nm (vert), 580-600 nm (jaune) et 620 nm (orange).

Trois programmeurs ont permis de régler à la fois l'alternance des différents éclairages amont (lampes à vapeur de mercure 400 W et 125 W ou obscurité) et celle de l'éclairage au niveau de l'entonnement (lampe infrarouge ou à vapeur de mercure 80 W).

Sur la rive opposée (en rive droite, dans une zone d'eau morte *a priori* non attractive pour le poisson en dévalaison) deux lampes à vapeur de mercure de 400 W et 250 W, orientées elles aussi vers l'amont, ont été installées pour effectuer des observations visuelles complémentaires sur les potentialités attractives ou répulsives de ces lumières.

Les durées des phases d'éclairage "amont" et "entonnement" ont varié au cours de la campagne. Dans un premier temps, les trois conditions d'éclairage "amont" (400 W-125 W-obscurité) ont été testées sur des périodes d'une durée de deux heures. La durée de l'éclairage "entonnement" par la lampe de 80 W a été fixée à une heure alternant avec une heure d'obscurité (ou plus exactement une heure avec éclairage infrarouge).

Pendant cette période préliminaire (nuit du 1^{er} au 2 avril à la nuit du 12 au 13 avril) quatre tests par nuit ont été effectués de 20 h à 5 h du matin. L'ensemble des combinaisons possibles (6 au total) étaient tirées au sort et testées sur 6 jours. Chaque combinaison a donc fait l'objet de deux répétitions pendant cette période.

Suite aux observations effectuées lors de la phase initiale, les durées de chaque condition d'éclairage "amont" et "entonnement" ont été réduites de moitié, sans que le protocole ne soit modifié. Chaque type d'éclairage "amont" était donc expérimenté pendant une heure alors que simultanément l'entonnement était alternativement éclairé ou non pendant 30 minutes. Ainsi du 14 avril au 9 mai, 9 tests par nuit ont pu être conduits (de 21 h à 6 h) ce qui permettait d'effectuer l'ensemble des combinaisons possibles des éclairages en 2 nuits. La diminution de la durée de la nuit s'est traduite à partir du 9 mai par la réduction à 8 du nombre de tests effectués entre 21 h 30 et 5 h 30.

Au total, chaque condition d'éclairage "amont" a fait l'objet de 170 répétitions, associée à deux conditions d'éclairage de l'entonnement, ce qui représente au total 340 observations pour chaque type de lumière amont. Sur l'ensemble de la campagne, il a donc été totalisé plus de 1000 tests au cours desquels l'entonnement a fait l'objet d'une surveillance vidéo continue.

3. RÉSULTATS

3.1. Paramètres du milieu

Les débits moyens journaliers de l'Allier ont varié de 5.5 m³/s à 48 m³/s (Fig. 4). A l'exception de deux crues de faible importance enregistrées du 11 au 16 avril et du 26 avril au 2 mai, avec des débits maximaux de 43 m³/s et 48 m³/s, la campagne de Poutès a été marquée dans son ensemble par une période de basses eaux.

La vanne automatique de décharge du barrage étant réglée pour s'ouvrir dès que le débit de l'Allier excède 33 m³/s, les deux crues enregistrées ont donc temporairement perturbé les observations.

La température moyenne journalière de l'eau s'est échelonnée entre 4.9 °C le 30 avril et 18.5 °C le 29 mai (Fig. 4). La valeur moyenne de la température sur l'ensemble de la période étudiée est de 11.9 °C ($\sigma = 3.7$). Les variations de la température de l'eau suivent grosso-modo les variations de la température de l'air avec un décalage de deux jours environ.

Sur les 72 journées d'expérimentations, 27 ont été marquées de précipitations notables, de plus ou moins grande importance. La valeur maximale a été relevée le 25 avril avec une hauteur de précipitation de 37.3 mm. Le printemps 1989 a été caractérisé par une pluviométrie relativement faible et il est à noter que pendant plus de la moitié de la campagne (37 jours exactement) les précipitations ont été absentes.

Figure 4 : Principaux paramètres du milieu et dévalaison journalière au niveau de l'exutoire.

Figure 4 : Main environmental parameters and daily smolts passages.

Sur l'ensemble des journées d'expérimentation, la pression atmosphérique (mesurée à 715 m d'altitude) a fluctué entre 897.8 hPa et 929.9 hPa. La moyenne journalière était de 919 hPa ($\sigma = 6.59$) (Fig. 4).

Le pH de l'eau de l'Allier n'a que très faiblement varié et a oscillé entre 6.8 et 7.0 unités pH.

La transparence de l'eau (Fig. 4) est dans l'ensemble toujours restée élevée à l'exception des deux périodes de crues lors desquelles ont été enregistrées les valeurs les plus faibles (0.7 m). La moyenne des transparences mesurées a été de 2.45 m ($\sigma = 0.6$), la valeur maximale observée pendant la durée de l'étude ayant été de 3.2 m.

La teneur en oxygène dissous (Fig. 4) a varié de 7.9 mg/l le 30 mars à 11.9 mg/l le 29 avril pour des températures respectives de 12.5 °C et 4.9 °C. Les taux de saturation ont varié de 77 % à 103 %.

3.2. Suivi de l'activité de dévalaison

3.2.1. Activité quotidienne

Au total 1595 smolts ont emprunté le dispositif de dévalaison de Poutès du 31 mars au 9 juin 1989 ce qui correspond à une moyenne de 22 smolts par jour sur l'ensemble de la période d'observation.

La courbe représentative des passages journaliers (Fig. 4) se distingue par un nombre de passages relativement faible mais constant (représentant plus de 50 % de la migration) entrecoupés çà et là de pics très ponctuels et peu marqués de courte durée (1 à 3 jours).

Il est important de souligner que les deux crues enregistrées sur l'Allier en 1989 ont notablement perturbé le recensement de la population dévalante. Dès que le débit excède 33 m³/s la vanne automatique de décharge s'ouvre et seuls quelques rares individus empruntent alors l'exutoire dont l'attractivité devient très faible par rapport à celle de la vanne. De ce fait, il est délicat de vouloir interpréter la courbe des passages dans l'exutoire sans parallèlement considérer les débits de l'Allier et surtout les déversements au barrage. Le second déversement ayant eu lieu au moment de la plus forte abondance de smolts au barrage, on peut supposer qu'une bonne partie des individus est passée par la vanne de décharge et n'a donc pu être comptabilisée. De même, lors de la seconde crue, la vanne automatique est restée ouverte six jours consécutifs, ce qui peut expliquer l'absence de toute manifestation migratoire importante au niveau de l'exutoire de dévalaison.

3.2.2. Activité nycthémérale

L'activité de dévalaison a été essentiellement nocturne puisque, sur l'ensemble de la campagne, 77 % des passages ont été comptabilisés la nuit contre 23 % le jour. Il est descendu en moyenne 5.2 smolts par période diurne ($\sigma = 15.43$) contre 17.3 par période nocturne ($\sigma = 28.09$). L'analyse de variance montre une différence hautement significative ($F = 0.019$; ddl = 1,140 ; $p = 0.002^{**}$).

Une très nette évolution du rythme nycthéméral est constatée au fur et à mesure que l'on avance dans la saison (Fig. 5) : pratiquement totalement nocturne en début de période migratoire (1^{re} semaine), le pourcentage de smolts dévalant la nuit oscille entre 98 % et 77 % de la seconde à la 7^e semaine d'observation, puis entre 65 % et 20 % les trois dernières semaines. La tendance s'inverse même lors de la 8^e semaine, où l'on observe 23 % de dévalaison nocturne contre 77 % de dévalaison diurne.

3.2.3. Activité horaire

Parallèlement aux différences d'activité enregistrées entre les périodes diurnes et nocturnes du nycthémère, certaines heures de la journée sont marquées par des passages significativement plus importants que d'autres. Si l'on considère l'ensemble de la campagne, la période 1 h-3 h (Fig. 6) semble particulièrement privilégier la dévalaison, alors que les heures "creuses" se situent entre 6 h et 11 h, puis entre 16 h et 21 h.

Les passages ont été comptabilisés plus finement par tranche horaire en regroupant les semaines deux à deux sur l'ensemble de la période d'expérimentation. Lors des quatre dernières semaines, on peut noter une activité diurne notable entre 13 h et 16 h (Fig. 7). Quelle que soit la période, on observe peu de passages entre 8 h et 11 h, puis entre 16 h et 21 h.

Figure 5 : Rythme nyctéméral des smolts dévalants.
Figure 5 : Evolution of diurnal passages of smolts.

Figure 6 : Variation du nombre de smolts dévalant par intervalle horaire à Poutès lors des expérimentations de 1989.
Figure 6 : Percentage of hourly passages of smolts in bypass structure during 1989 experiments.

Figure 7 : Variation du nombre de smolts dévalant par intervalle horaire et en regroupant les semaines 2 à 2 sur l'ensemble de la période d'expérimentation.
Figure 7 : Evolution of percentage of hourly passages of smolts during 1989 experiments by two-weeks periods.

3.3. Influence de la lumière sur l'activité de dévalaison nocturne des smolts

3.3.1. Effet de l'éclairage de l'exutoire de dévalaison par les lampes à vapeur de mercure

Les enregistrements vidéo des passages à l'exutoire afférents aux deux séries de tests effectués sur la lumière ont été analysés séparément.

3.3.1.1. Résultats obtenus avec un cycle d'éclairage amont de deux heures

Dans la première série (nuit du 1^{er}-2 avril à la nuit du 12-13 avril) alors que les durées des différentes phases de l'éclairage "amont" (400 W-125 W-obscurité) étaient fixées à deux heures et celles de l'éclairage "entonnement" (80 W ou infrarouge) à une heure, l'analyse de variance (Fig. 8) montre que le nombre de smolts dévalant varie de façon significative avec la puissance des lampes en fonctionnement à l'amont de la glissière ($F = 3.75$; ddl = 2,99 ; $p = 0.027^*$).

En effet, sur les 363 smolts descendus et comptabilisés pendant cette période, la majeure partie (83 %) a dévalé avec un éclairage à l'amont (56 % avec la lampe de 125 W et 27 % avec la lampe de 400 W). Seulement 17 % des passages ont été enregistrés en l'absence d'éclairage.

Par contre, l'éclairage de l'entonnement avec la lampe de 80 W ne semble en rien influencer le passage du poisson : bien que le plus grand nombre de smolts ait dévalé en phase d'éclairage (55 %), la différence n'est cependant pas significative ($F = 0.302$; ddl = 1,100 ; $p = 0.59$).

Il n'existe d'autre part aucune interaction significative entre les effets des conditions d'éclairage amont et ceux de l'entonnement ($F = 0.68$; ddl : 2,96 ; $p = 0.51$). Toutefois, il faut noter qu'à chaque fois que l'amont est laissé dans l'obscurité ou faiblement éclairé (125 W), le plus grand nombre de passages est enregistré lorsque l'entonnement est éclairé (80 W). A l'opposé, avec un fort éclairage à l'amont (400 W), les passages les plus nombreux sont observés lorsque l'entonnement est laissé dans l'obscurité (Fig. 8).

Lorsque l'exutoire et/ou l'amont sont éclairés, les passages des smolts sont, quelles que soient les conditions d'éclairage, entre trois et huit fois plus importants qu'en l'absence totale d'éclairage.

3.3.1.2. Résultats obtenus avec un cycle d'éclairage amont d'une heure

Dans la seconde série de tests (nuit du 14-15 avril à la nuit du 8-9 juin), alors que la durée de l'éclairage amont était réduite à une heure et celle de l'entonnement à 30 minutes, il n'est constaté aucune différence significative dans le nombre de smolts dévalant suivant les différentes conditions d'éclairage amont, bien que les passages soient plus importants lors des phases d'éclairage. En effet, sur les 643 individus observés pendant cette seconde période, 36 % ont dévalé lorsque la lampe de 400 W était allumée, 36 % avec celle de 125 W et 28 % lorsque l'amont était laissé dans l'obscurité ($F = 0.964$; ddl = 2,939 ; $p = 0.38$).

Par contre, l'éclairage de l'entonnement semble influencer de façon hautement significative ($F = 14.1$; ddl = 1,940 ; $p = 0.0002^{***}$) le passage des smolts puisque plus des 2/3 d'entre eux ont dévalé lorsque le projecteur de 80 W était en allumé (Fig. 8).

N.B. : Les résultats des analyses de variance sont donnés sous la forme usuelle :

$$(F = 4.9 ; \text{ddl} = 2,249 ; p = 0.007^{**})$$

où F : le rapport de la variance expliquée à la variance inexpliquée

ddl : les degrés de liberté

p : le seuil de signification

(*) signifie une différence significative au seuil de signification de 5 %

(**) signifie une différence très significative au seuil de signification de 1 %

(***) signifie une différence très hautement significative au seuil de signification de 0.1 %

Références :

— WANNACOTT T. et WANNACOTT R. 1984. Statistiques. Economica, 790 p.

— DAGNELIE P. 1986. Théorie et méthodes statistiques, volume III. Presses Agronomiques de Gembloux, 461 p.

Il n'existe d'autre part aucune interaction significative entre les effets des conditions d'éclairage amont et ceux de l'entonnement ($F = 2.08$; $ddl = 2,936$; $p = 0.125$) : quel que soit l'éclairage amont, les passages sont plus importants lorsque l'exutoire est éclairé. Par contre, lorsque l'exutoire est laissé dans l'obscurité, les passages demeurent notables tant que l'amont reste éclairé. En l'absence de tout éclairage les moyennes des passages des smolts deviennent entre 2.5 et 4.5 fois moins nombreux qu'avec l'éclairage. La seconde série de tests confirme donc les observations recueillies au cours de la première série.

Figure 8 : Comparaison du nombre moyen de smolts dévalant au niveau de l'exutoire en fonction de l'éclairage dans l'entonnement et de l'éclairage à l'amont (1re et 2e série de tests).

Figure 8 : Mean rate of smolts passages in relation to the lighting conditions of the bypass and upstream area.

3.3.2. Effet du paramètre "heure" et interaction lumière-heure

Le paramètre heure de dévalaison a été intégré comme troisième facteur dans toutes les analyses de variance effectuées sur les lumières pour vérifier que l'influence éventuelle d'un éclairage ne découle pas des heures préférentielles de passage au niveau de l'entonnement et donc tout simplement du rythme biologique propre du poisson.

Lors des premières séries de tests le comportement migratoire du poisson au niveau de l'exutoire ne semble pas être influencé par le facteur "heure", les différences de passage d'une heure à l'autre pendant la nuit n'étant pas significatives ($F = 0.847$; $ddl = 7,68$; $p = 0.55$). Il n'existe aucune interaction entre ce facteur et les deux autres facteurs testés, c'est-à-dire que les effets éventuels des différentes conditions de lumières testées ne sont pas liés à l'heure de passage.

Dans la seconde série de tests, l'influence de l'heure de dévalaison devient significative ($F = 2.1$; $ddl = 8,899$; $p = 0.03$), les plus faibles passages étaient enregistrés entre 21 h et 23 h. Toutefois, comme précédemment, aucune interaction n'est constatée entre l'effet des lumières testées à l'amont ou au niveau de l'entonnement et l'heure de passage.

3.3.3. Temps de réaction des poissons aux variations d'éclairage

Pour essayer de mettre en évidence un temps de réaction éventuel du poisson après un changement d'éclairage, on a analysé les passages au niveau de l'entonnement par intervalles de temps de 20 minutes lors de la première série de tests et de 10 minutes lors de la seconde série. Plusieurs analyses de variance à un ou deux facteurs ont été effectuées.

Pour la première série de tests (changement d'éclairage au clapet toutes les heures), chaque observation, c'est-à-dire le nombre de smolts par intervalle de temps de 20 minutes, a été affectée d'un code différent suivant qu'il correspondait à un passage se situant dans l'intervalle 0-20 minutes, 20-40 minutes, 40-60 minutes et plus de 60 minutes suivant l'allumage ou l'extinction de la lampe de 80 W située à l'aplomb de l'entonnement.

Pour la seconde série de tests, lors desquels les changements d'éclairage au niveau de l'exutoire étaient effectués toutes les demi-heures, un codage similaire a été adopté mais avec les intervalles 0-10 minutes, 10-20 minutes, 20-30 minutes et au delà de 30 minutes suivant l'éclairage ou suivant l'extinction de la lampe 80 W.

Lors des premiers tests (comprenant un échantillon de 624 observations comportant entre 66 et 114 répétitions de chaque valeur codée), on observe après l'allumage de la lampe une augmentation progressive des passages entre l'instant de l'allumage et une heure, puis une diminution des passages après une heure (Fig. 9) : dans les quatre intervalles de temps considérés (0-20 mn, 20-40 mn, 40-60 mn, + 60 mn), les passages moyens sont respectivement de 0.41, 0.61, 0.76, 0.53 smolt/20 mn. Par contre, on n'observe aucune tendance nette après l'extinction de la lampe : dans les quatre intervalles de temps considérés (0-20 mn, 20-40 mn, 40-60 mn, + 60 mn) après l'extinction de la lampe, les passages moyens sont respectivement de 0.48, 0.41, 0.47, 0.55 smolt/20 mn. Ces valeurs ne sont pas significativement différentes ($F = 0.495$; $ddl = 7,616$; $p = 0.84$).

On a introduit dans l'analyse de variance comme deuxième facteur l'éclairage amont : il n'existe aucune interaction entre l'effet des deux variables ($F = 0.715$; $ddl = 14,600$; $p = 0.76$) et on retrouve la même tendance à l'augmentation des passages après l'allumage de la lampe de 80 W (Fig. 9) quelles que soient par ailleurs les conditions d'éclairage amont (400 W, 125 W, obscurité). On retrouve évidemment les résultats notés plus haut, à savoir des passages beaucoup plus nombreux pour un éclairage amont de 125 W que dans les autres conditions (400 W et obscurité) : les moyennes sont respectivement de 1.0, 0.42, 0.21 smolt/20 mn.

Pour les tests suivants, correspondant à la période du 14 avril au 9 juin, l'analyse a porté dans un premier temps sur un échantillon de 1182 observations comportant entre 132 et 165 répétitions de chaque valeur codée ; on s'est en effet limité volontairement aux nuits pendant lesquelles il avait été observé plus de 10 poissons dans l'entonnement.

Figure 9 : Variation du nombre moyen de smolts dévalant par intervalle de 20 minutes suivant l'éclairage du clapet et l'éclairage amont (1re série de tests).

Figure 9 : Evolution of mean rate of smolts passages by 20 mn period after a change of lighting condition of the bypass (first series of tests).

On observe là encore, après l'allumage de la lampe, une augmentation continue des passages entre l'instant de l'allumage et une heure (Fig. 10) : lors des quatre intervalles de temps considérés (0-10 mn, 10-20 mn, 20-30 mn, 30-60 mn), les moyennes des passages sont respectivement de 0.25, 0.44, 0.57, 0.83 smolt/10 mn. Les différences entre ces moyennes sont cette fois hautement significatives ($F = 6.02$; $ddl = 7,1174$; $p = 0.0000^{***}$).

Il n'existe aucune tendance très nette après l'extinction de la lampe : dans les quatre intervalles de temps considérés (0-10 mn, 10-20 mn, 20-30 mn 30-60 mn) après l'extinction, les moyennes des passages sont respectivement de 0.34, 0.24, 0.27, 0.22 smolt/10 mn (Fig. 10).

On a introduit dans l'analyse de variance comme deuxième facteur l'éclairage amont : il n'existe aucune interaction entre l'effet des deux variables ($F = 1.51$; $ddl = 14,1158$; $p = 0.10$) ; on ne retrouve par ailleurs aucune influence significative des conditions d'éclairage amont sur les passages ($F = 1.62$; $ddl = 2,1158$; $p = 0.20$) (Fig. 10).

3.3.4. Observations visuelles complémentaires effectuées au niveau de l'entonnement

Suite aux expérimentations effectuées en 1984 (GUIVARCH, 1984), l'écoulement devant transiter par l'entonnement avait été fixé à 0.5 m³/s le jour et 1 m³/s la nuit. L'objet des expérimentations décrites dans le présent rapport étant de mettre en évidence l'influence de la lumière sur l'efficacité de l'exutoire de dévalaison, il avait été décidé au début de la campagne

de conserver dans la mesure du possible le débit dans l'exutoire constant et égal à 0.5 m³/s, de jour comme de nuit, afin de supprimer une source supplémentaire de variabilité.

Figure 10 : Variation du nombre moyen de smolts dévalant par intervalle de 10 minutes suivant l'éclairage du clapet et l'éclairage amont (2^e série de tests) et nuits à plus de 10 poissons).

Figure 10 : Evolution of mean rate of smolts passages by 10 mn period after a change of lighting conditions at the bypass (second series of tests).

Certaines observations visuelles effectuées en 1989 ont confirmé les observations antérieures, à savoir que le facteur hydrodynamique semblait prépondérant pour le fonctionnement de l'exutoire. Si les lampes à vapeur de mercure attirent incontestablement le poisson à proximité de l'exutoire, en revanche, elles n'assurent pas forcément le passage immédiat de tous les poissons : le débit de 0.5 m³/s est vraisemblablement insuffisant pour leur assurer une dévalaison optimale.

Attirés à l'amont par les lampes à vapeur de mercure, les smolts tournent un certain temps devant l'exutoire avant de s'engager sur la plaque de l'entonnement. La phase exploratoire est souvent assez longue, l'occupation spatiale de l'entonnement ne laissant cependant pas apparaître de zones de stationnement ou de passage privilégiées.

Au cours de la campagne, lors de mauvais réglages accidentels de la cote de la vanne soutenant l'entonnement, il a été observé que le poisson passait beaucoup plus volontiers avec des débits plus importants, débits que l'on a estimé à 2 m³/s environ.

Un problème important et totalement imprévu est apparu lors de cette étude. En effet, les lampes à vapeur de mercure semblent attirer les salmonidés sans distinction de genre : certaines grosses truites vivant dans la retenue du barrage remontaient la nuit pour chasser

les smolts qui, attirés par la lumière des lampes à vapeur de mercure, s'étaient concentrés près de l'entonnement. Cette prédation a perturbé d'une façon difficile à apprécier le comportement migratoire des juvéniles aux abords de l'entonnement et, de ce fait, a induit un biais impossible à quantifier dans les expérimentations.

3.3.5. Observations ponctuelles effectuées à l'opposé de l'exutoire de dévalaison

Parallèlement aux tests menés sur l'ensemble de la période de dévalaison au niveau de l'exutoire, une quinzaine de nuits ont été consacrées à effectuer des observations complémentaires sur le comportement des smolts vis-à-vis des lampes à vapeur de mercure.

Lorsque la présence de smolts était constatée, l'un des deux projecteurs 400 W et 250 W installés en rive droite du barrage, côté opposé à la glissière, était allumé. Après les 3 minutes nécessaires aux lampes pour atteindre leur pleine puissance (temps d'amorçage), il fallait attendre entre 10 et 12 minutes pour voir arriver les premiers smolts. Le banc grossissait alors progressivement, alimenté par la venue de nouveaux arrivants. Les poissons tournaient autour du halo lumineux en évitant la plupart du temps de pénétrer dans la zone où l'éclairement était le plus intense. Les smolts se tenaient généralement à une profondeur notable (de l'ordre de 2 m), ce qui rendait les observations difficiles, remontaient de temps à autre en surface pour replonger immédiatement.

Les poissons incontestablement attirés par la lumière à vapeur de mercure restaient dans la zone d'influence des lampes une quinzaine de minutes avec la lampe de 400 W et de l'ordre de 30 minutes avec la lampe de 250 W puis disparaissaient. Ce sont ces observations qui ont conduit à diminuer les durées des phases d'éclairage au niveau de l'exutoire, réduites comme on l'a vu plus haut de moitié au cours de la seconde partie de la campagne.

Si au bout d'une vingtaine de minutes, les poissons après avoir été attirés par les vapeurs de mercure avaient tendance à désertir les zones lumineuses, en revanche ils étaient particulièrement sensibles aux ruptures d'éclairage. En effet, si au bout d'une demi-heure à trois quarts d'heure d'éclairage plus aucun smolt n'était visible depuis la surface, il suffisait d'éteindre la lampe pendant une trentaine de minutes et de la rallumer pour constater comme précédemment l'arrivée progressive de smolts vers la source lumineuse. Ces expériences souvent répétées ont toujours provoqué les mêmes effets.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Lors d'expérimentations effectuées en 1987 et 1988 à la centrale hydroélectrique d'Halsou sur la Nive (LARINIER et BOYER-BERNARD, 1991), plusieurs sources d'éclairage avaient été testées à titre exploratoire : les passages des smolts par le clapet de dévalaison étaient significativement plus importants lorsque le clapet était maintenu dans l'obscurité que lorsqu'il était éclairé directement avec le projecteur halogène (2000 W) ou une lampe à vapeur de mercure (400 W) et ce, quel que soit le débit transitant par le clapet. Cependant, les observations visuelles avaient indiqué que le poisson semblait être attiré par les lumières à vapeur de mercure, mais qu'il se maintenait à la frange du pinceau lumineux. Ces résultats confirmaient ceux d'expérimentations ou d'observations effectuées par d'autres auteurs (GUIVARCH, 1984 ; HAYMES *et al.*, 1984 ; TAFT, 1988), à savoir que si l'effet de la lumière est indubitable, le phénomène est complexe car il semble dépendre du type de lumière (longueur d'ondes), de son intensité et de la situation des lampes par rapport à la zone où l'on désire concentrer le poisson. On en avait cependant conclu qu'il devait être possible d'attirer le poisson dans une zone d'étendue plus réduite en utilisant des lampes à vapeur de mercure de plus faible puissance.

C'est ce qui a été fait à Poutès où l'entonnement situé en amont de l'exutoire a été éclairé avec une lampe de 80 W : les expérimentations ont en effet montré que les passages à travers l'exutoire sont significativement plus nombreux lorsque celui-ci est éclairé. L'effet d'attraction des lampes n'est cependant pas immédiat : les analyses de variance montrent que 10 mn à 15 mn sont nécessaires pour attirer le poisson, l'effet maximal étant observé au bout d'une demi-heure.

On peut tenter d'interpréter les résultats précédents en abordant certains aspects du mécanisme de la vision chez les poissons.

La rétine des poissons, comme celle de l'homme, contient deux types de cellules photoréceptrices : les cônes, spécialisés dans la vision photopique ("à la lumière") et les bâtonnets, spécialisés dans la vision scotopique ("dans l'obscurité"). L'adaptation de la rétine à l'obscurité ou à la lumière n'est pas immédiate. Les résultats expérimentaux (BRETT et ALI, 1958) montrent que chez les salmonidés la réponse des cônes à une exposition brutale à la lumière est progressive pendant une quinzaine de minutes, atteignant un palier d'adaptation au bout de 20-25 minutes. L'adaptation à la lumière est totale au bout d'environ 40 minutes. La réponse des bâtonnets à une exposition brutale à l'obscurité est notablement plus lente, la couche de pigment ne commençant à se contracter qu'au bout de 20 minutes, l'adaptation des bâtonnets à l'obscurité ne devenant totale qu'au bout d'une heure environ.

La transition entre les deux formes de vision est fonction de l'espèce considérée (ALI et KLYNE, 1986). Des expérimentations (BRETT et ALI, 1958) montrent que dans les conditions naturelles la transition commence à s'effectuer sur les juvéniles de saumon du pacifique lorsque l'intensité de la lumière à la surface de l'eau est voisine de 50 à 100 lux et qu'elle est totale lorsque l'intensité descend en dessous de 0,3 lux.

KAWAMURA (1983) présente les résultats d'expérimentations effectuées en laboratoire et sur le terrain en vue de rationaliser et d'améliorer l'efficacité de la pêche commerciale à l'aide d'un éclairage artificiel par des lampes à vapeur de mercure, méthode utilisée depuis longtemps mais de façon plus ou moins empirique. L'examen histologique montre que la vision des maquereaux attirés à proximité d'une lampe reste dans le domaine scotopique, même pour des poissons capturés deux heures après l'allumage de la lampe, alors que la transition vision photopique-vision scotopique chez le maquereau s'effectue en 30 minutes. L'auteur conclut qu'une lampe trop intense ou qu'un trop fort gradient de lumière sont susceptibles d'être répulsifs pour le poisson. Par ailleurs, des expérimentations au sonar sur l'anchois et la sardine montrent que la distribution des poissons sous les lampes est liée à l'intensité lumineuse : les poissons demeurent à distance de la lampe, distance correspondant à la zone où l'intensité de la lumière se situe à la transition vision scotopique-vision photopique (respectivement 0,004 lux et 0,2 lux pour les deux espèces considérées).

Une autre observation concerne le renouvellement des poissons attirés par la lumière : les individus ne restent pas indéfiniment au voisinage des lampes, un renouvellement se produisant toutes les demi-heures à une heure.

L'auteur propose en conclusion, pour attirer et concentrer les poissons très près d'une lampe, de réduire l'intensité de la lumière au dessous du seuil vision scotopique-vision photopique. Il préconise aussi, pour capturer le maximum possible des poissons attirés, de répéter les opérations de capture suivant une périodicité inférieure à celle du renouvellement.

Ces conclusions rejoignent celles que l'on peut tirer des expérimentations effectuées à Poutès ; elles permettent par ailleurs d'interpréter certains résultats obtenus sur d'autres sites qui paraissent *a priori* contradictoires ou peu cohérents (HADDERINGH, 1982 ; HAYMES *et al.*, 1984 ; TAFT 1988).

Les expérimentations effectuées au barrage de Poutès permettent de préconiser pour ce site l'installation d'un mode d'éclairage — dont l'efficacité restera cependant encore à tester — susceptible d'améliorer sensiblement le rendement de l'exutoire de dévalaison :

— éclairage intermittent de l'amont de l'exutoire avec une lampe de 400 Watts (1/2 heure allumée, 1/4 d'heure éteinte) afin d'attirer le poisson à proximité de l'exutoire.

— éclairage en continu de l'entonnement avec une lampe à vapeur de mercure de faible puissance (50-80 Watts).

L'utilisation de la lumière peut aussi être envisagée pour éviter l'entraînement des poissons dans une prise d'eau. Le simple fait d'éclairer les grilles peut inciter le poisson à se tenir à distance de ces dernières : l'une des causes souvent évoquée de l'entraînement du poisson à travers les grilles d'une prise d'eau est en effet la perte de repères visuels dans l'obscurité (PAVLOV, 1989). L'effet peut se trouver renforcé si le niveau de l'éclairage se situe au-dessus de la transition vision scotopique-vision photopique qui induira une réaction de phototaxie négative de la part du poisson. Cela ne pourra fonctionner évidemment que si les vitesses d'approche restent suffisamment faibles de telle sorte que le passage du poisson ne soit pas "forcé" à travers la grille.

Il est possible aussi d'empêcher l'accès du poisson dans une zone bien délimitée en se basant uniquement sur l'effet répulsif de certains types d'éclairage. Des essais ont été effectués en utilisant des lampes stroboscopiques à éclats au xénon. Les résultats des tests effectués en laboratoire ou *in situ* (FIELDS, 1966 ; SAGER *et al.*, 1987 ; McININCH et HOCUTT, 1987 ; PATRICK et McKINLEY, 1987 ; TAFT, 1988), bien que quelquefois peu significatifs, sont cependant prometteurs.

On ne peut cependant espérer contribuer à l'amélioration d'un exutoire de dévalaison par utilisation de la lumière que dans la mesure où la majorité des poissons dévalent la nuit, ce qui est le cas à Poutès ; il est en effet peu probable, et certaines expérimentations le confirment (TAFT, 1988), qu'un éclairage quel qu'il soit soit susceptible d'inverser le rythme nycthéméral ou se révèle efficace de jour.

L'éclairage ne pourra par ailleurs, dans le meilleur des cas, amener qu'une amélioration, et ne se substituera jamais aux facteurs primordiaux d'efficacité de tout dispositif de dévalaison que sont incontestablement les facteurs hydrodynamiques : position adéquate et largeur convenable de l'exutoire, charge et débit suffisants dans l'exutoire, accélération progressive, absence de décollements et de turbulences au niveau de l'entonnement.

5. REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre de conventions liant le Conseil Supérieur de la Pêche à E.D.F. (Service de la Production Hydraulique).

Nous tenons à remercier :

— le G.R.P.H. Loire, pour avoir autorisé l'étude et tout particulièrement le personnel de la Centrale de Monistrol d'Allier pour avoir contribué au bon déroulement de l'expérimentation.

— la Direction des Etudes et Recherches d'E.D.F. pour avoir mis à disposition le matériel vidéo de surveillance.

— MM. PUJO et CAZIN, les ingénieurs, techniciens et la garderie de la Délégation Régionale du CSP Auvergne-Limousin, ainsi que la garderie des fédérations de la Haute-Loire et de la Lozère.

6. BIBLIOGRAPHIE

ALI M.A., KLYNE M.A., 1986. La vision chez les vertébrés. Décarie Masson 266 p.

BEACH M.H., 1978. The use of infra-red light and closed circuit TV to validate records from automatic fish counters. *J. Fish. Biol.*, 13, 639-644.

BOYER-BERNARD Sylvie, LARINIER M., 1991. Suivi de la dévalaison des smolts de saumon atlantique au barrage de Poutès sur l'Allier (43). CSP-CEMAGREF, Rapport Ghaappe 91.04., 23 p.

BRETT J.R., ALI M.A., 1958. Some observations on the structure and photomechanical responses of the pacific salmon retina. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 15(5), 815-829.

BOMASSI P., TRAVADE F., 1985. Projet de réimplantation du saumon dans la partie supérieure de l'Allier : expériences sur les possibilités de dévalaison des saumoneaux au barrage hydroélectrique de Poutès en 1983 et 1984. Colloque pour la restauration des rivières à saumons. Bergerac, 28 mai-1^{er} juin 1985.

CLIQUE P.M. TRAVADE F., 1986. Barrage de Poutès : aménagement d'une glissière pour la dévalaison des juvéniles de saumons. Laboratoire National d'Hydraulique, rapport E4318632, 11 p.

FIELDS E., 1966. Final report on migrant salmon light guiding studies. U.S. Army Engineer Division, North Pacific Corps of Engineers Portland, Oregon, 258 p.

- GUIVARCH P., 1984. Etude des possibilités de franchissement du barrage de Poutès (Allier) par les juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) en avalaison. Mémoire de fin d'étude, E.N.S.A.R., 42 p.
- HADDERINGH R., 1982. Experimental reduction of fish impingement by artificial illumination at Bergum power station. *Int. Review Ges. Hydrobiol.*, 67(6), 887-900.
- HAYMES P., PATRICK P., ONISTO L., 1984. Attraction of fish to mercury vapour light and its application in a generating station forebay. *Int. Review Ges. Hydrobiol.*, 69(6), 867-876.
- KAWAMURA G., 1983. Vision and behaviour of fish in the vicinity of fish lamp. Proc. Intl. Conf. Dev. Managt. Trop. Living Aquat. Resources. Serdag, Malaysia ; 2-5 Aug. 1983, 197-204.
- LARINIER M., BOYER-BERNARD Sylvie, 1991. Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine d'Halsou sur la Nive. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 321, 72-92.
- McININCH S.P., HOCUTT C.H., 1987. Effects of turbidity on estuarine response to strobe lights. *J. Appl. Ichtyol*, 3, 97-105.
- PATRICK P.H., McKINLEY R.S., 1987. Behavioural systems to guide or divert fish at hydro-electric facilities. Canadian Electrical Association, rapport CEA 513 G 543, 45 p.
- PAVLOV D.S., 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish : USSR. FAO, Fisheries Technical Paper, 308. Rome, 98 p.
- PROTASOV V.R., 1970. Vision and near orientation of fish (translated from Russian). Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 175 p.
- SAGER D.R., HOCUTT C.H., 1987. Estuarine fish responses to strobe light, bubble curtains and strobe light/bubble-curtain combinations as influenced by water flow rate and flash frequencies. *Fisheries Research*, 5, 383-399.
- TAFT N., 1988. Evaluations of fish protection systems for use at hydroelectric plants. *Hydroreview*, avril 1988, 54-62.