IMPACT DES AMÉNAGEMENTS SUR LA MIGRATION ANADROME DU SAUMON ATLANTIQUE (*SALMO SALAR* L.) SUR LE GAVE DE PAU (FRANCE).

M. CHANSEAU, O. CROZE et M. LARINIER

CNRS - CEMAGREF - GHAAPE, Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur
Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

Reçu le 19 mai 1999

Accepté le 03 juin 1999

Received 19 May, 1999

Accepted 03 June, 1999

RÉSUMÉ

Le suivi par radiotélémétrie de la migration anadrome de 114 saumons atlantiques sur le Gave de Pau, réalisé de 1995 à 1997, a permis d'étudier l'impact de 31 des 37 obstacles érigés sur l'axe de migration. Cinq obstacles majeurs ont été identifiés en regard de leur faible perméabilité et/ou des retards qu'ils induisent ainsi que de leur position sur l'axe. La transparence de ces 5 aménagements permettrait à plus de 80 % (contre seulement 13 % dans la situation actuelle) des saumons de parvenir sur de bonnes zones de frayères. L'accumulation des retards au niveau de chaque obstacle peut empêcher une proportion non négligeable des poissons de parvenir à temps sur les meilleures zones de frayères, notamment ceux qui se présentent à l'automne sur le gave, ou ceux qui, ralentis par les obstacles, effectuent un arrêt estival sur la partie aval du cours d'eau. Les seuils de stabilisation en enrochements de faible hauteur (< 1,5 m) ont été perméables à la migration, la plupart des poissons ayant été retardés moins de 24 heures. Les seuils de hauteur (> 2,5 m) supérieure ont eu des impacts variables, imputables en grande partie au type de passe à poissons. Les passes à bassins et les rivières de contournement ont été les dispositifs de franchissement les plus performants. Les passes à ralentisseurs à chevrons épais se sont révélées peu performantes en raison de leur faible débit d'alimentation et de leur grande sensibilité aux variations des niveaux d'eau amont. L'impact des aménagements hydroélectriques sans dérivation dépend de l'emplacement de l'entrée de la passe à poissons et de son débit d'alimentation : des effets minimums sur la migration ont été observés lorsque les ouvrages étaient équipés d'un dispositif mobilisant des débits importants (2-4 m³/s) et dont l'entrée se situait dans le canal de fuite. L'impact des aménagements hydroélectriques munis d'une dérivation, tous équipés d'un dispositif de franchissement au niveau des barrages de prise d'eau, dépend des débits réservés dans les parties court-circuitées. Ces bras deviennent très attractifs pour les poissons lorsque leur débit est supérieur à 500 l/s/m de largeur au niveau de la confluence avec les canaux de fuite. La grande majorité des franchissements d'obstacles (85,6 %) a eu lieu en pleine journée. Seules les rivières de contournement assurent un passage nocturne important et semblent respecter davantage les rythmes naturels de migration du saumon.

Mots-clés : saumon atlantique, migration anadrome, aménagement hydroélectrique, seuil, passe à poissons, radio-pistage.

THE IMPACT OF OBSTACLES ON THE PAU RIVER (FRANCE) ON THE UPSTREAM MIGRATION OF RETURNING ADULT ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR* L.).

ABSTRACT

Radio-tracking of 114 returning adult Atlantic salmon on the Pau River during a 3-year study (1995-1997) was used to determine the impact of 31 of the 37 obstacles built on the river. Five obstacles located downstream of spawning areas have a major effect on upstream migration with respect to the proportion of fish being able to pass over and the migration delays. An improvement in the facilities allowing fish to pass over these obstructions would enable more than 80 % of them (as opposed to 13 % currently) to reach good spawning grounds. Migration delays can prevent a large proportion of the population from reaching the spawning grounds in time, and this is especially true for fish which enter the river later in autumn or fish which stop their migration for a « quiescent period » in the lower part of the river after being delayed by several obstacles. The lowest weirs (< 1.5 m) seem not to delay fish migration with most of the fish being able to pass over within 24 hours. Higher weirs (> 2.5 m) have variable effects on migration depending on the type of fishpass. Pool passes and natural bypass channels are the most efficient. Denil fishpass with floor baffles are not very efficient and this is mainly due to limited operational flow and higher sensitivity to upstream flow level variations. Effects of hydroelectric power plants without diversion depend on the location of fish pass entrances and the flow in the fishway : minimum effects on migration have been observed at plants fitted with fish passes with significant flow (2-4 m³/s) located in the tailrace. The effect of plants with diversion canal, all fitted with fish passes at dam, are related to the restricted flow in the by-passed section of the river. Dam flow discharge with values greater than 500 l/s/m of width at the confluence with the tailrace attract fish. Most upstream passing of obstacles (85.6 %) occurs during the day. Only natural bypass channels enable a significant proportion of fish to pass over the obstacles at night.

Key-words : Atlantic salmon, upstream migration, hydroelectric power plant, weir, fish pass, radio-tracking.

INTRODUCTION

Il y a moins d'un siècle, les eaux du Gave de Pau étaient encore largement fréquentées par le saumon atlantique (*Salmo salar*). Les zones de frayères s'étendaient de Bérenx à l'amont de Lourdes, soit sur près de 100 km. Mais le développement industriel et surtout la construction de barrages ont réduit le saumon à l'état de relique. Les populations de saumons se sont effondrées à partir de la construction de barrages, au niveau de la ville d'Orthez, qui n'étaient pas au départ équipés de passes à poissons (MARTY, 1984). Cette régression s'est encore intensifiée au fil des années suite à l'édification de nouveaux obstacles majeurs, comme Baigts, et à la transformation de moulins à grains en microcentrales qui s'est traduite par une augmentation conséquente des débits dérivés. La construction du barrage d'Artix en 1958, non équipé de passe à poissons, condamne définitivement l'accès aux frayères amont et aboutit à la quasi-disparition du saumon sur le Gave de Pau.

Plus récemment, les extractions intensives de matériaux alluvionnaires dans le lit mineur du gave au cours des années 1970-1980 ont entraîné de profonds bouleversements dans la morphologie du cours d'eau, en particulier un enfoncement du lit qui a conduit à la construction de plusieurs seuils de stabilisation constituant autant d'obstacles potentiels à la migration.

Dans le cadre du plan de restauration des salmonidés grands migrateurs et des obligations réglementaires, l'aménagement de dispositifs de franchissement a été réalisé sur la plupart des obstacles non équipés. Si la réouverture totale du Gave de Pau paraît maintenant réalisée, il convenait cependant de vérifier la franchissabilité des différents ouvrages, en particulier de certains dispositifs de conception ancienne ou d'implantation contestable dont l'efficacité pouvait être mise en doute.

Une étude de radiotélémétrie a été réalisée sur trois ans, de 1995 à 1997, afin de déterminer l'impact des différents obstacles sur la migration anadrome des saumons sur l'ensemble de l'axe.

LE GAVE DE PAU

Le Gave de Gavarnie, naissant du cirque du même nom et grossi par les Gaves de Cauterets, de Luz et d'Azun devient le Gave de Pau à hauteur d'Argelès. Il s'écoule ainsi sur 175 km, d'abord sud-nord des sources jusqu'à Lourdes, puis s'oriente sud-est/nord-ouest pour venir confluer avec le Gave d'Oloron puis l'Adour avant de rejoindre l'Océan Atlantique au niveau de Bayonne (Figure 1).

Le bassin du Gave de Pau est soumis à la double influence du climat océanique et de la proximité du massif pyrénéen. Le régime du cours d'eau, de type nivo-pluvial, est marqué par des précipitations annuelles importantes et l'apport prononcé de fonte des neiges : une période d'étiage en fin d'été (août et septembre), d'eaux de fonte d'avril à juin et de fortes précipitations pluviales en décembre. Les affluents de coteaux rive gauche et rive droite se caractérisent par un régime de type essentiellement pluvial, avec des crues violentes et des étiages estivaux très sévères.

Il existe deux stations de mesure des débits qui sont situées, l'une dans la partie amont du secteur d'étude au pont de Rieulhès (bassin versant 1 120 km²), à l'aval immédiat de Lourdes, et l'autre dans la partie aval du secteur d'étude, au pont de Bérenx (bassin versant 1 120 km²). Les modules interannuels sont respectivement de 43 m³/s et 79 m³/s pour la période 1973-1997. La Figure 2 présente les débits moyens mensuels au niveau des deux stations.

OBSTACLES À LA MIGRATION

Il existe aujourd'hui trente-huit obstacles sur la partie du gave classée pour le saumon et la truite de mer. Les 31 obstacles situés entre le barrage de Puyoo, premier obstacle important sur l'axe, et l'aménagement du Lac des Gaves, qui constitue pratiquement la limite amont de l'aire historique de répartition du saumon sur le gave, ont fait l'objet d'un suivi dans le cadre de la présente étude (Figure 1).

Sur ce secteur existent une douzaine de seuils de stabilisation en enrochements de hauteur variant de 1 m environ à plus de 3,50 m (Figure 3) et une vingtaine de seuils ou barrages associés à des prises d'eau pour la production d'électricité dont les hauteurs varient de 1 m environ à plus de 10 m.

Les aménagements hydroélectriques situés sur la partie aval du secteur d'étude sont pour la plupart caractérisés par des débits d'équipement importants (50 m³/s à 110 m³/s) et des dérivations très courtes sinon absentes (Figure 4).

Figure 1
Situation géographique du Gave de Pau et localisation des obstacles.

Figure 1
Geographical situation of Pau river and location of obstacles.

Figure 2
Débits moyens mensuels au niveau des stations du pont de Rieulhès (▨) et du pont de Bérenx (■).

Figure 2
Mean monthly flows at Rieulhès bridge station (▨) and Berenx bridge station (■).

A

B

C

D

Figure 3

Vue aérienne des seuils en enrochements de Denguin (A), Artiguelouve (B), Meillon (C) et Narcastet (D).

Figure 3

Aerial view of the weirs of Denguin (A), Artiguelouve (B), Meillon (C) and Narcastet (D).

B

C

Figure 4

Vue aérienne des aménagements hydroélectriques de Baigts (A), Biron (B) et Artix (C) situés sur la partie aval du Gave de Pau.

Figure 4

Aerial view of Baigts plant (A), Biron plant (B) and Artix plant (C) located in the lower part of the Pau river.

Les ouvrages hydroélectriques situés sur la partie amont du secteur, de hauteur généralement plus faible que les précédents, ont des débits d'équipement inférieurs ($12 \text{ m}^3/\text{s}$ à $30 \text{ m}^3/\text{s}$) mais comportent des dérivations court-circuitant des portions plus ou moins importantes du gave (Figure 5).

En regard de la configuration des aménagements et de leur hauteur, une quinzaine d'ouvrages (dont les ouvrages de Baigts, Sapso, Biron, Artix, Heid, Meillon, Peyrouse, Lac des Gaves) peuvent être considérés, *a priori*, comme des obstacles totalement et en permanence infranchissables, sinon par le dispositif de franchissement.

Cinq ouvrages ne sont pas équipés de dispositif de franchissement. Il s'agit des seuils en enrochements de Lacq, Lescar 1, Loustau, Gaye et Toustard, tous étant de hauteur modérée.

Les autres obstacles sont équipés d'une ou plusieurs passes à poissons : rivières de contournement, passes à bassins, passes à ralentisseurs, aménagements rustiques, débarrages. Certains dispositifs installés sur les seuils de stabilisation (passes à ralentisseurs de fond à chevrons épais) sont destinés à assurer à la fois le franchissement de l'obstacle par les poissons et par les canoës-kayaks.

A

B

C

Figure 5

Vue aérienne des aménagements hydroélectriques de Toustard (A), Peyrouse (B) et Vizens (C) situés sur la partie amont du Gave de Pau.

Figure 5

Aerial view of Toustard plant (A), Peyrouse plant (B) and Vizens plant (C) located in the upper part of the Pau river.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Période d'étude

La migration des saumons sur le Gave de Pau a été étudiée durant 3 années consécutives, de 1995 à 1997. Le piégeage des saumons et le suivi des poissons radiomarkés ont débuté, selon les années, de la mi-mai à début juillet pour se terminer aux alentours de la mi-décembre.

Débit et température de l'eau

Les débits ont été relevés aux 2 stations de mesure de Rieulhès et de Bérenx (Figure 1).

Des stations d'enregistrement (centrales LOGICAP) des températures de l'eau ont été installées au niveau des aménagements de Toustard et d'Artix (Figure 2).

Capture et marquage des poissons

Les poissons ont été capturés dans la passe à bassins équipant le barrage de Puyoo. Deux fois par jour, le matin et en fin d'après-midi, la passe était fermée afin de contrôler la présence éventuelle de poissons dans le piège. Les saumons piégés étaient anesthésiés à l'aide de phénoxy-2-éthanol dans la proportion de 2,5 ml pour 10 litres d'eau. Les poissons étaient mesurés (longueur totale), leur sexe déterminé et leur aspect général relevé : couleur de la robe, présence de poux de mer... Les poissons blessés, écaillés ou chétifs étaient écartés.

Lors des 3 années d'étude, 114 saumons ont été marqués en introduisant un émetteur dans leur estomac à l'aide d'un tube poussoir en plastique. Ce marquage stomacal est généralement considéré comme la méthode la mieux adaptée au saumon adulte lors de sa migration en rivière (STASKO et PINCOCK, 1977 ; SOLOMON et STRORETON-WEST, 1983) car elle ne nécessite pas une longue manipulation du poisson et permet une récupération rapide des individus. De plus, la régurgitation est généralement faible (SMITH, CAMPBELL et MacLAINE, 1998).

Transport des saumons

En raison des difficultés rencontrées par les saumons pour parvenir sur le haut du bassin, et afin d'évaluer l'impact d'un maximum d'obstacles sur la migration anadrome, les poissons marqués ont été relâchés en plusieurs points sur l'axe.

Suivi par radiotélémetrie

L'ensemble du matériel utilisé est de marque ATS (Advanced Telemetry System). Les émetteurs sont de forme cylindrique (60 x 20 mm Ø) et pèsent dans l'air entre 20 et 22,5 g. L'antenne mesure 25 cm de long. Le poids de l'émetteur représente nettement moins de 1,5 % du poids du poisson. Chaque émetteur a une fréquence propre d'émission comprise entre 48 et 49,9 Mhz. L'autonomie minimale de ces émetteurs, garantie par le constructeur, est de 220 jours.

Des stations de réception fixes automatiques ont été installées au niveau d'une quinzaine d'obstacles tout au long de l'axe ; elles ont permis d'enregistrer les heures d'arrivée, celles de départ, et par conséquent les durées de présence ainsi que les retards de migration.

Des contraintes évidentes en ce qui concerne l'alimentation électrique et la protection du matériel installé n'ont pas permis d'équiper l'ensemble des aménagements, en particulier les seuils en enrochements. Entre les différents obstacles qui jalonnent le gave et au niveau des obstacles non équipés de postes fixes, le suivi des déplacements des poissons a été réalisé de façon manuelle (en voiture, à pied et en avion). Dans le souci de recueillir le maximum de données, on s'est efforcé d'obtenir au moins quotidiennement des informations sur la position de chaque poisson radiomarkué. Pour les retards induits par ces aménagements, seules des fourchettes de valeurs ont pu être estimées. Lorsqu'un poisson a été localisé à l'amont d'un obstacle sans jamais avoir été repéré au pied de l'ouvrage, un retard maximum a été calculé en tenant compte de sa dernière localisation à l'aval, et de sa première localisation à l'amont, ainsi que de la distance séparant ces deux localisations. Dans ce cas, le retard minimum est considéré comme étant inférieur à 24 h. Quand un poisson a été repéré plusieurs fois au pied d'un obstacle puis à l'amont, le retard minimum correspond au laps de temps séparant les premier et dernier repérages.

RÉSULTATS

Une vingtaine d'obstacles sur les 31 étudiés au cours des 3 années ont reçu la visite d'au moins 10 poissons (jusqu'à 24 saumons), nombre permettant de se faire une idée relativement précise de l'influence de ces ouvrages sur la migration (Tableau I). L'impact général des autres aménagements a pu être évalué plus ou moins grossièrement en intégrant la connaissance et l'expertise des sites aux résultats des études téléométriques.

Tableau I
Caractéristiques des obstacles étudiés.

Table I
Characteristics of the studied obstacles.

OBSTACLES	INDICE KILOMETRIQUE	HAUTEUR (mètre)	TYPE	USAGE	DEBIT TURBINE MAXIMUM (m3/s)	DISPOSITIF FRANCHISSEMENT	NOMBRE POISSONS	% EFFICACITE
BAIGTS	8	11	Barrage	Electricité	90	P. à ralentisseurs	34	35
SAPSO	16,5	4,8	Barrage	Electricité	48	P. à ralentisseurs	19	73,7
BIRON	18,5	4	Barrage	Electricité	110	Rivière	20	100
LACQ	35,6	1,5	Seuil	Stabilisation	-	-	15	100
ARTIX	41	6,5	Barrage	Electricité	90	P. à bassins	16	94
DENGUIN	48,8	2,5-3	Seuil	Stabilisation	-	P. à ralentisseurs	15	93,3
ARTIGUELOUVE	54,2	2,5	Seuil	Stabilisation	-	P. à bassins	14	100
LESCAR I	56,8	1,2	Seuil	Stabilisation	-	-	14	100
MARSAN	65,4	1	Seuil	Electricité	4	-	13	100
HEID	67,2	3	Seuil	Electricité	30	P. à ralentisseurs	12	58,3
MEILLON	71	3,8	Seuil	Stabilisation	-	Rivière	10	100
NARCASTET	71,9	2,6	Seuil	Stabilisation	-	P. à ralentisseurs	10	70
GAYE	95	< 1	Seuil	Electricité	3,5	-	10	100
TOUSTARD	98,6	1	Seuil	Electricité	24	-	24	91,6
PEYROUSE	102	3,5	Seuil	Electricité	30	P. à bassins	21	76,2
VIZENS	106,9	3	Seuil	Electricité	30	P. à bassins	16	62,5
LA GROTTE	109,1	1,5	Seuil	Electricité	12	P. à bassins	10	100
LATOUR	111,8	1	Seuil	Electricité	30	Bassins rustiques	10	80

Rythmes et vitesses de migration

Soixante-dix valeurs de vitesse de déplacement ont pu être déterminées entre les différents aménagements équipés de stations fixes réceptrices (Figure 6). La majorité des vitesses de déplacement observées sont comprises entre 0,3 km/h (7,2 km/jour) et 1,6 km/h (38,4 km/jour) avec des maxima de 2 km/h (48 km/jour). Les vitesses semblent liées à la température de l'eau ($p < 0,05$), la quasi-totalité des déplacements supérieurs à 1 km/h se déroulant pour des températures supérieures à 14° C.

Figure 6

Vitesses de déplacement des poissons entre 2 obstacles équipés de station de réception automatique en fonction des températures de l'eau.

Figure 6

Swimming speeds of fish between 2 obstacles fitted with automatic listening station according to water temperatures.

Des vitesses de déplacement sur des portions de cours d'eau, comportant plusieurs aménagements, ont été calculées sur trois tronçons distincts.

Le premier tronçon, situé sur le bas du bassin, est compris entre les obstacles de Baigts et de Biron et est long de 10,5 kilomètres. Les 8 poissons qui ont effectué ce parcours ont dû franchir les aménagements de Baigts et de Sapso, deux obstacles majeurs du Gave de Pau. Ce tronçon exerce un impact important sur la migration, les vitesses moyennes de déplacement étant très faibles, généralement inférieures à 0,5 km/jour. La majorité des poissons a mis plus de 3 semaines pour parcourir cette distance pour des maximums supérieurs à 2 mois (Figure 7A).

Le second tronçon, d'un linéaire de 48,7 kilomètres, situé immédiatement dans la continuité du premier, couvre la partie moyenne du cours d'eau jusqu'à la ville de Pau qui se situe à l'aval des premières bonnes zones de frayères. Il inclut 8 obstacles, pour la plupart des seuils en enrochements, et a été parcouru par 12 saumons. La majorité des poissons a présenté des vitesses moyennes de déplacement comprises entre 2,4 km/jour et 8,4 km/jour, supérieures à celles du premier tronçon. Trois poissons ont toutefois mis plus de 1 mois, avec un maximum de 100 jours pour un saumon incluant un arrêt estival de près de 70 jours de début août à début octobre (Figure 7B).

Figure 7A

Temps mis par les poissons pour parcourir le premier tronçon (10,5 km) situé entre les aménagements de Baigts et de Biron.

Figure 7B

Temps mis par les poissons pour parcourir le deuxième tronçon (48,7 km) situé entre l'aménagement de Biron et la ville de Pau.

Figure 7C

Temps mis par les poissons pour parcourir le troisième tronçon (20,3 km) situé entre les aménagements de Toustard et Agos.

Figure 7A

Progression rates in the first reach (10.5 km) between Baigts plant and Biron plant.

Figure 7B

Progression rates in the second reach (48.7 km) between Biron plant and Pau.

Figure 7C

Progression rates in the third reach (20.3 km) between Toustard plant and Agos plant.

Le troisième enfin, situé au niveau des meilleures zones de frayères, sur la partie amont du secteur d'étude, est long de 20,3 kilomètres et inclut 5 aménagements hydroélectriques munis de dérivation, les dispositifs de franchissement étant tous situés au niveau des barrages. Deux groupes de poissons peuvent être individualisés : ceux qui ont mis moins de 27 jours (vitesses comprises entre 0,7 et 1,4 km/jour) pour parcourir le tronçon et ceux qui ont mis plus de 37 jours (vitesses inférieures à 0,5 km/jour) (Figure 7C).

Le suivi des déplacements a montré que la grande majorité des arrêts de migration a été induit par les différents obstacles érigés sur l'axe (Figures 8 et 9). Après avoir franchi un ouvrage, les poissons ont la plupart du temps nagé jusqu'à l'aménagement suivant sans marquer de réels arrêts de migration. Dans ces conditions, il était difficile de mettre en évidence un effet quelconque des débits du gave ou de la température de l'eau, seule la présence des obstacles rythmant le déplacement des poissons.

Figure 8
Mouvements des saumons 200, 220 et 1740 sur le Gave de Pau.

Figure 8
The movements of salmon 200, 220 and 1740 within the Pau river.

Figure 9
Mouvements des saumons 1820, 501 et 1060 sur le Gave de Pau.

Figure 9
The movements of salmon 1820, 501 et 1060 within the Pau river.

Les déplacements de 6 saumons ont mis en évidence une des composantes naturelles de la migration des saumons en rivière : les arrêts estivaux. Ces poissons ont stoppé leur migration dans un pool ou un profond entre la fin juillet et la mi-août généralement après une augmentation des températures de l'eau (plus de 2° C en moins d'une semaine) associée à une baisse des débits. Ces arrêts ont été compris entre 40 jours et 75 jours. Les reprises de migration se sont toutes effectuées à l'automne, entre fin septembre et mi-octobre, après de fortes diminutions des températures (jusqu'à 4° C en moins d'une semaine).

Franchissabilité des obstacles

La franchissabilité des différents obstacles a été évaluée en termes de retard à la migration et de pourcentage de poissons se présentant au pied des ouvrages et parvenant à passer à l'amont. Il est intéressant de remarquer que les résultats obtenus lors de 3 années d'étude sont relativement homogènes, et ce malgré des conditions hydrologiques différentes.

Les obstacles de faible hauteur, inférieure à 1,5 m, en l'occurrence les seuils de Lacq, Lescar 1, Marsan et Gaye, non équipés de dispositif de franchissement, laissent passer la totalité des saumons, la grande majorité des poissons franchissant ces obstacles en moins de 24 heures (Figure 10). Les retards induits dans la migration sont faibles, très peu de saumons ayant d'ailleurs pu être localisés au pied de ces obstacles.

Les seuils en enrochements de hauteur supérieure à 2,5 m, équipés de dispositif de franchissement, s'avèrent plus difficilement franchissables (Figure 11). Deux d'entre eux (Artiguelouve et Meillon) sont totalement perméables et laissent passer tous les poissons en moins d'une semaine, la majorité en moins de 3 jours. Les deux autres (Denguin et Narcastet) sont plus sélectifs, respectivement 70 % et 90 % des poissons passant l'amont. Près de 30 % des saumons ont été bloqués plus d'une semaine avec des retards dans la migration pouvant dépasser 20 jours.

Les aménagements hydroélectriques situés sur la partie aval du secteur d'étude dépourvus de dérivations importantes, présentent des perméabilités variables. Deux d'entre eux (Biron et Artix) laissent passer la quasi-totalité des poissons. Ces aménagements ne retardent pas (Biron) ou peu (Artix) la migration des saumons, les 2 autres ouvrages s'avérant par contre très sélectifs (Baigts, Sapso), entraînant de retards conséquents pouvant dépasser 2 mois (Figure 12).

Les ouvrages hydroélectriques situés sur la partie amont du secteur, caractérisés par des débits d'équipement beaucoup plus faibles (12 à 30 m³/s) et des secteurs court-circuités plus importants, présentent eux aussi des perméabilités variables. Deux d'entre eux permettent le franchissement de la plupart des individus (Toustard et La Grotte), les trois autres aménagements (Peyrouse, Vizens et Latour) se révélant nettement plus sélectifs. Trois de ces ouvrages (Toustard, La Grotte et Latour), ont laissé passer la grande majorité des poissons dans les 3 jours. Les deux autres aménagements (Peyrouse, Vizens), infranchissables sinon par la passe à poissons en regard de leur hauteur (supérieure à 3 m) et de leur topographie, ont provoqué des retards plus importants, près de la moitié des poissons étant bloquée plus de 3 jours (Figure 13).

Performance des dispositifs de franchissements

Certains obstacles, comparables tant par leur nature (seuil de stabilisation ou aménagement hydroélectrique), leur configuration et l'emplacement des passes à poissons, ont présenté des franchissabilités variables. Il était tentant de comparer les performances des différents dispositifs de franchissement.

Figure 10

Délais de migration maximum (■) et minimum (▨) au niveau des seuils en enrochements de hauteur inférieure à 1,5 m.

Figure 10

Maximum (■) and minimum (▨) migration delays at weirs lower than 1.5 m.

Figure 11
Délais de migration maximum (■) et minimum (▨) au niveau des seuils et enrochements de hauteur supérieure à 2,5 m.

Figure 11
Maximum (■) and minimum (▨) migration delays at weirs higher than 2.5 m.

Figure 12
Délais de migration au niveau des aménagements hydroélectriques situés sur la partie aval du Gave de Pau.

Figure 12
Migration delays at hydroelectric plants located in the lower part of the river.

Figure 13

Délais de migration au niveau des aménagements hydroélectriques situés sur la partie amont du Gave de Pau.

Figure 13

Migration delays at hydroelectric plant located in the upper part of the river.

Figure 14A

Délais maximums de migration au niveau de seuils équipés d'une passe à ralentisseurs (■), d'une passe à bassins (▨) et d'une rivière artificielle (▤).

Figure 14B

Délais minimums de migration au niveau de seuils équipés d'une passe à ralentisseurs (■), d'une passe à bassins (▨) et d'une rivière artificielle (▤).

Figure 14A

Maximum migration delays at weirs fitted with Denil fish pass (■), pool fish pass (▨) and artificial river (▤).

Figure 14B

Minimum migration delays at weirs fitted with Denil fish pass (■), pool fish pass (▨) and artificial river (▤).

Au niveau des seuils en enrochements

Il a ainsi été possible de comparer l'efficacité des passes à ralentisseurs, des passes à bassins et des rivières artificielles au niveau des seuils de Denguin, Artiguelouve, Meillon, Narcastet et Assat (Figures 14A et 14B). Ces obstacles, implantés sur une distance de 25 kilomètres, sont de hauteur (entre 2,5 et 3,5 m) et de largeur comparables. Ils sont soumis aux mêmes conditions de débit, aucun affluent ne venant augmenter de façon sensible le débit du gave entre les différents obstacles. De plus, les passes sont toutes situées en berge, sur la rive opposée à l'écoulement principal.

L'obstacle équipé d'une rivière artificielle (Meillon) a laissé passer tous les poissons en moins d'une semaine. Quarante pour cent des poissons ont subi des retards inférieurs à une journée. Aucun poisson n'ayant pu être localisé au pied de l'obstacle, tous ont très bien pu franchir l'aménagement en moins de 24 heures.

Les seuils équipés de passe à bassins (Assat et Artiguelouve) ont retardé la majorité des individus moins d'une semaine, près de 90 % d'entre eux ayant pu passer à l'amont en moins d'une journée. Un seul poisson a été retardé plus d'une semaine ; ce retard peut être attribué à une obstruction de la passe, le passage à l'amont de ce poisson étant survenu dans les 24 heures qui ont suivi le nettoyage du dispositif de franchissement.

Les ouvrages équipés de passes à ralentisseurs (Denguin et Narcastet) ont été plus sélectifs (84 %) et ont entraîné des retards de migration significativement plus importants, moins de 50 % des poissons ayant pu franchir ces obstacles en moins de 24 heures. De plus, 20 % d'entre eux ont été bloqués au minimum une semaine.

Au niveau d'aménagements hydroélectriques

Les aménagements de Biron et d'Artix présentent des similitudes tant par leur débit d'équipement des usines (respectivement 90 m³/s et 110 m³/s) que leur configuration (pas de dérivation). L'obstacle de Biron, équipé d'une rivière de contournement alimentée par un débit de 4 m³/s, a été totalement perméable à la migration, induisant des retards le plus souvent inférieurs à 24 heures, révélant une très bonne efficacité du dispositif de franchissement. La passe à bassins d'Artix (débit de 750 l/s plus 2,5 m³/s de débit d'attrait) a été moins performante que la rivière de Biron. Elle a permis le passage de la grande majorité des poissons mais 35 % des saumons ont été retardés plus de 3 jours. Toutefois, pendant les deux premières années d'étude, le dispositif a été nettement sous-alimenté (conduite délivrant le débit complémentaire d'attrait en grande partie obturée), ce qui a pu réduire son attractivité et par conséquent augmenter les durées de blocage.

Influence des débits dans les tronçons court-circuités

L'influence des débits réservés dans les bras court-circuités a été étudiée au niveau de 4 aménagements hydroélectriques (Toustard, Peyrouse, Vizens et Latour) situés sur l'amont du secteur d'étude, comparables tant par leur configuration (longueur et largeur des bras et des canaux de fuite) que par les débits d'équipement des usines, compris entre 24 m³/s et 30 m³/s (Figure 15). Les horaires de 206 incursions dans les bras court-circuités ou dans les canaux de fuite ont pu être enregistrés ainsi que les débits instantanés turbinés et déversés lors de ces incursions.

Les poissons s'engagent préférentiellement dans les canaux de fuite des aménagements tant que les débits dans les bras court-circuités restent inférieurs à 6 m³/s, les saumons y pénétrant même près de 7 fois sur 10 lorsque les différents bras ne sont alimentés que par le débit réservé, soit environ 1,2 m³/s (Figure 16A). Cette tendance s'inverse pour des débits supérieurs à 6 m³/s (soit 14 % du module), valeur qui correspond au niveau de ces aménagements à environ 20 % à 25 % du débit turbiné (Figure 16B).

Si l'on rapporte les débits d'alimentation des bras à leur largeur au niveau de la confluence avec les canaux de fuite, il apparaît que jusqu'à 200 l/s/m, les poissons ont tendance à remonter préférentiellement dans les canaux, les bras court-circuités devenant nettement plus attractifs lorsque les valeurs dépassent 500 l/s/m (Figure 16C).

Conditions de franchissement des passes

Horaires de franchissement

Les horaires de 90 franchissements de passes à poissons ont été déterminés. Il apparaît que 85,6 % d'entre eux se sont effectués de jour contre à peine 14,4 % en pleine nuit. En ce qui concerne les franchissements nocturnes, 10 d'entre eux, soit 77 %, ont eu lieu au niveau des aménagements équipés d'une rivière de contournement et 3 dans une passe à bassins.

Figure 15
Présentation des aménagements hydroélectriques munis de dérivation.

Figure 15
Presentation of hydroelectric plants with derivation.

Durée de franchissement

Vingt-cinq durées de présence dans les passes à poissons précédant le franchissement d'un obstacle ont été déterminées au cours des 3 années d'étude : 18 d'entre elles concernent les rivières de contournement de Biron et du Lac des Gaves et 7 concernent une passe à bassins.

Les deux rivières de contournement étudiées ne sont comparables, ni par leur situation sur l'axe de migration, ni par leur débit d'alimentation, leur longueur et leur pente. La première (aménagement de Biron) est située sur l'aval du secteur d'étude. Elle est longue de 250 m, est alimentée par un débit de 4 m³/s et a une pente moyenne de 1,6 %. Les temps de séjour à l'intérieur du dispositif ont été relativement homogènes : 7 saumons sur 10 ont parcouru les 250 m en moins de 1 h 40, ce qui correspond à des vitesses de déplacement comprises entre 0,14 km/h et 0,25 km/h. Trois poissons enfin ont été présents environ 2 h 30 dans la rivière, ce qui correspond à des vitesses moyennes de l'ordre de 0,10 km/h.

Figure 16A

Remontées des poissons dans les bras court-circuités (■) et les canaux de fuite (▨) en fonction du débit (m³/s) dans les bras court-circuités.

Figure 16B

Remontées des poissons dans les bras court-circuités (■) et les canaux de fuite (▨) en fonction du pourcentage du débit dans les bras court-circuités par rapport au débit turbiné.

Figure 16C

Remontées des poissons dans les bras court-circuités (■) et les canaux de fuite (▨) en fonction du débit (m³/s) par mètre de largeur des bras court-circuités.

Figure 16A

Fish incursions into the by-passed sections (■) and into the tailraces (▨) in relation with discharge (m³/s) in the by-passed sections.

Figure 16B

Fish incursions into the by-passed sections (■) and into the tailraces (▨) in relation with discharge percentage in the by-passed sections compared to discharge in the tailraces.

Figure 16C

Fish incursions into the by-passed sections (■) and into the tailraces (▨) in relation with discharge (m³/s) per meter of width in the by-passed sections.

La rivière artificielle du Lac des Gaves est située sur la partie amont du secteur d'étude, 100 kilomètres à l'amont de l'aménagement de Biron. Elle est longue de 1,2 km, est alimentée par un débit de 1,5 m³/s et a une pente moyenne de 1 %. Les 8 franchissements n'ont concerné que deux poissons, un saumon ayant remonté puis descendu la rivière plusieurs fois. A cinq reprises, les poissons ont mis entre 2 h 30 et 4 h 00 pour parcourir les 1,2 km de la rivière, ce qui correspond à des vitesses moyennes de déplacement comprises entre 0,29 km/h et 0,47 km/h. Les durées de franchissement les plus importantes (8 h 40 et 10 h 10) ont été observées lorsque les poissons ont pénétré à l'intérieur du dispositif de franchissement en pleine journée.

La passe à fentes verticales de l'aménagement d'Artix est composée de 22 bassins et est alimentée par un débit de 750 l/s. Les durées de présence de 7 saumons dans la passe ont pu être déterminées. Cinq poissons ont mis moins de 2 heures pour parcourir les 19 premiers bassins, ce qui correspond à des durées moyennes de stationnement par bassin comprises entre 3 mn et 6 mn. Un poisson a séjourné en moyenne près de 21 mn par bassin pour un temps total de présence dans la passe supérieur à 6,5 heures. Ce saumon a été le seul à s'engager de nuit à l'intérieur du dispositif de franchissement.

Températures lors des franchissements

La très grande majorité des entrées dans les passes a été observée pour des températures de l'eau comprises entre 9° C et 20° C. Onze franchissements se sont effectués pour des températures de l'eau supérieures à 20° C avec un maximum de 24,4° C. Seules 4 entrées à l'intérieur des dispositifs se sont effectuées pour des températures inférieures à 9° C (minimum 7,5° C), 3 d'entre elles se produisant dans une rivière artificielle.

Dévalaison des dispositifs

Des dévalaisons d'obstacles par le dispositif de franchissement ont pu être mis en évidence uniquement au niveau de la rivière de contournement du Lac des Gaves. Les horaires de 8 descentes de la rivière dont 7 suivies d'une remontée du dispositif de franchissement ont été enregistrés. La grande majorité de ces dévalaisons a été effectuée de nuit ou au crépuscule, une seule d'entre elles, la plus longue (près de 12 h 00), ayant débuté en pleine journée. A 5 reprises, les temps ont été inférieurs à 2 h 15, ce qui correspond à des vitesses de dévalaison comprises entre 0,54 km/h et 2 km/h.

DISCUSSION

Rythmes de migration

Les déplacements des poissons sur le Gave de Pau sont, à l'heure actuelle, entièrement artificialisés. Les arrêts de migration s'effectuent généralement au pied des obstacles, les poissons nageant jusqu'à l'aménagement suivant après avoir franchi un ouvrage. Ce sont plus les obstacles et leur difficulté de franchissement que les paramètres de débit et de température qui rythment la remontée des saumons. Toutefois, lors des 3 années d'étude, les températures de l'eau ont été la plupart du temps comprises entre 7° C et 20° C, plage de valeurs permettant aux saumons d'exprimer pleinement leur comportement migratoire (ALABASTER, 1990 ; JONSSON, 1991 ; CRISP, 1996). Entre les aménagements, les vitesses de déplacement, comprises entre 0,3 km/h et 1,6 km/h, sont du même ordre de grandeur que les valeurs couramment observées sur des portions non obstruées de cours d'eau (HAWKINS et SMITH, 1986 ; LAUGHTON, 1989).

Un des rares phénomènes naturels à avoir pu être observé est l'arrêt estival de migration (WEBB, 1989 ; LAUGHTON, 1991 ; WEBB, 1992). Les arrêts mis en évidence, compris entre 40 jours et 75 jours, sont généralement précédés d'une nette augmentation des températures de l'eau associée à une baisse des débits. Trois d'entre eux sont survenus après que les poissons se soient présentés au pied d'un obstacle. Les reprises de migration, au début de l'automne, se produisent suite à de fortes diminutions des températures.

Franchissabilité des ouvrages et restauration des stocks

Les trois années d'étude ont permis de mettre en évidence l'impact de 31 sur la migration anadrome des poissons des 38 obstacles construits sur le cours d'eau, et d'obtenir une vision globale de l'ensemble de l'axe migratoire pour une distance totale de plus de 126 kilomètres de cours d'eau. Un classement des obstacles a pu être effectué en intégrant la connaissance et l'expertise des différents sites, leur position sur l'axe, les retards engendrés, les pourcentages de franchissement et le nombre de poissons sur lequel reposent ces observations.

Seize aménagements n'ont pas présenté de réelles difficultés de franchissement, laissant passer la quasi-totalité des poissons dans des délais très souvent inférieurs à 3 jours. Dix ouvrages constituent de plus sérieux obstacles à la migration en termes de blocage sur une partie de la population migrante et/ou de retards notables dans la migration. Cinq aménagements enfin représentent des obstacles majeurs à la migration des poissons, ces ouvrages étant sélectifs et induisant des retards de migration importants pouvant dépasser une cinquantaine de jours. L'un d'entre eux (Baigts) est incompatible avec tout plan de restauration en regard de sa forte sélectivité (35 % des poissons sont passés à l'amont), des délais de migration qu'il induit (jusqu'à 79 jours) et de sa position très aval sur l'axe.

En l'état actuel des choses, si l'on ne tient compte que de la sélectivité des différents obstacles érigés sur l'axe, 13 % des saumons peuvent parvenir à l'amont de la ville de Pau, sur de bonnes zones de frayères, et 3 % à peine peuvent atteindre les meilleures zones situées à l'amont de la ville de Nay.

On peut raisonnablement penser que les problèmes de franchissement seront résolus sur les obstacles majeurs, comme ils l'ont été récemment au barrage d'Artix, les causes des dysfonctionnements ayant été identifiées. Dans l'hypothèse où ces aménagements seraient transparents, 80 % des poissons parviendraient à l'amont de Pau et 50 % à l'amont de Nay.

Si, de plus, on considère les retards induits par tous les aménagements, un certain nombre de poissons ne pourra arriver à temps sur les frayères, notamment ceux qui se présentent tardivement sur le gave, pendant les mois de septembre et d'octobre (près de 30 % des poissons lors des 3 années), certains saumons ayant en effet mis plus de 4 mois pour atteindre la ville de Pau. Le même problème se pose pour les poissons qui, retardés par les aménagements situés sur l'aval du secteur d'étude, effectuent un arrêt estival jusqu'à l'automne sur les parties basse et moyenne du secteur d'étude. Il convient donc également de réduire les retards à la migration, en particulier au niveau des obstacles situés à l'aval des meilleures zones de frayères, en modifiant ou complétant les aménagements actuels.

Efficacité des dispositifs de franchissement

Les différents dispositifs de franchissement étudiés ont présenté des performances très variables selon le type d'ouvrage sur lesquels ils ont été construits.

Au niveau des usines hydroélectriques ne comportant pas de dérivation, l'efficacité des dispositifs de franchissement dépend plus de leur implantation et de leur débit que du type de passe. Des dispositifs dont l'entrée, située dans le canal de fuite, mobilise des débits importants ($2-4 \text{ m}^3/\text{s}$), permettent le passage de la très grande majorité des poissons et n'engendrent que de faibles retards de migration. La majorité des franchissements dans les passes à bassins s'effectue en pleine journée, comme il l'a été constaté sur d'autres cours d'eau (DARTIGUELONGUE et LANGON, 1998 ; GOWANS, ARMSTRONG et PRIEDE, 1999). Par contre, une fraction importante des franchissements des rivières de contournement s'effectue de nuit, ces dispositifs paraissant ainsi respecter davantage les rythmes naturels des déplacements des saumons, principalement nocturnes (MILNER, 1990 ; SMITH et SMITH, 1997).

Les perméabilités des différents aménagements comportant une dérivation dépendent autant des conditions de débit dans les parties court-circuitées que des dispositifs de franchissement (type et implantation) équipant ces ouvrages.

Au niveau des seuils en enrochements, les dispositifs de franchissement ont présenté des efficacités variables. Les passes à ralentisseurs à chevrons épais, installées autant pour le canoë-kayak que pour le poisson sur les premiers seuils aménagés sur le gave, ne paraissent adaptées ni à ce type d'obstacle, ni à un cours d'eau comme le Gave de Pau, comme l'avait déjà noté LARINIER (1992). Ces dispositifs, installés le plus souvent en berge au niveau des seuils dont la largeur est importante (plus de 90 m), transitent des débits faibles rendant leur attractivité insuffisante. Elles sont très sensibles aux variations du niveau d'eau amont et souvent sujettes à des obstructions.

Les passes à bassins à gros débit ($> 1 \text{ m}^3/\text{s}$ en étiage) et les rivières de contournement ont été nettement plus performantes que les passes à ralentisseurs, laissant passer la quasi-totalité des poissons dans des délais acceptables, la plupart inférieurs à 3 jours. Elles sont de plus beaucoup moins sensibles aux variations des niveaux d'eau.

Il n'en reste pas moins vrai que, de tous les obstacles étudiés sur le gave, ceux qui ont eu l'impact le plus faible sur la migration des saumons ont été les seuils en enrochements de hauteur inférieure à 1,2-1,5 m, non équipés de dispositif de franchissement. Aucun poisson n'a d'ailleurs pu être localisé au pied de ces ouvrages lors des 3 années d'étude. Ce type d'aménagement limite par ailleurs considérablement les problèmes d'entretien qui s'avèrent être l'un des problèmes majeurs des dispositifs de franchissement implantés sur les seuils en enrochements (LARINIER, 1992).

Influence des débits dans les tronçons court-circuités

Des débits de l'ordre de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit 14 % du module au niveau des obstacles étudiés) dans les tronçons court-circuités, valeur qui correspond à 20-25 % du débit turbiné maximum, sont apparus nécessaires pour augmenter de façon significative l'attractivité de ces bras court-circuités, les poissons remontant préférentiellement dans ces conditions au pied des barrages alors que les usines fonctionnent pourtant à plein régime.

Les valeurs obtenues ne sont *a priori* valables que pour les aménagements étudiés, caractérisés par des débits d'équipement de l'ordre de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ et des largeurs des canaux de fuite et des bras voisins respectivement de 10-15 m et 25 m. Si l'on rapporte les débits d'alimentation des bras à leur largeur au niveau de la confluence avec les canaux de fuite, il apparaît que jusqu'à 200 l/s/m , les poissons ont tendance à remonter préférentiellement dans les canaux, les bras court-circuités devenant nettement plus attractifs lorsque les valeurs dépassent 500 l/s/m .

CONCLUSION

On peut être raisonnablement optimiste sur les possibilités de réouverture du Gave de Pau à la migration du saumon en améliorant la transparence des obstacles majeurs identifiés lors de l'étude. Le système n'en demeure pas moins fragile et il conviendra de le maintenir sous haute surveillance, en particulier en ce qui concerne l'entretien des dispositifs de franchissement. Présence de dérivations, débits réservés insuffisants, piégeage dans les canaux de fuite des usines, défaut d'entretien ou de maintenance des dispositifs, sont autant de sources supplémentaires de retards ou de blocage.

Cette étude illustre par ailleurs plusieurs principes souvent énoncés dans les ouvrages ou manuels techniques traitant des dispositifs de franchissement, principes qui tiennent du bon sens et de l'expertise mais qui sont rarement étayés par des exemples concrets. Elle montre en particulier clairement que la notion d'efficacité d'un dispositif de franchissement recouvre non seulement le pourcentage de franchissement mais aussi le retard dans la migration induit par l'obstacle. Un cours d'eau comportant de nombreux obstacles, même équipé de dispositifs de franchissement performants, peut induire des retards dont le cumul est susceptible de mettre en péril la réussite d'un plan de restauration.

REMERCIEMENTS

Les études sur le terrain ont bénéficié de l'aide technique de J.M. BACH et E. GALIAY.

Nous remercions tous les producteurs autonomes qui nous ont permis d'installer du matériel dans leurs locaux ainsi que la SHEM et EDF, en particulier les groupements de Lau Balagnas et de Baigts, les Fédérations des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées-Atlantiques pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, l'AAPPMA de Lourdes et MIGRADOIR.

BIBLIOGRAPHIE

- ALABASTER J.S., 1990. The temperature requirements of adult Atlantic salmon, *Salmo salar* L., during their upstream migration in the River Dee. *J. Fish Biol.*, 37, 659-661.
- CRISP D.T., 1996. Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia*, 323, 201-221.
- DARTIGUELONGUE J., LANGON M., 1998. Contrôle du fonctionnement de l'ascenseur à poissons de Tuilières en 1997. Suivi de l'activité ichthyologique. Rapport S.C.E.A pour M.I.G.A.DO., 33 p.
- GOWANS A.R.D., ARMSTRONG J.D., PRIEDE I.G., 1999. Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *J. Fish. Biol.*, 54, 713-726.
- HAWKINS A.D., SMITH G.W., 1986. Radio-tracking observations on Atlantic salmon ascending the Aberdeenshire Dee. *Scottish Fisheries Research Report*, 36, 24 p.
- JONSSON N., 1991. Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. *Nordic J. Freshw. Res.*, 66, 20-35.
- LARINIER M., 1992. Le franchissement des buses, des seuils en enrochements et des ouvrages estuariens. *Bull. Fr. Pêche Pisc.*, 326-327, 111-124.
- LAUGHTON R., 1989. The movements of adult salmon within the River Spey. *Scottish Fisheries Research Report*, 41, 19 p.

- LAUGHTON R., 1991. The movements of adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Spey as determined by radiotelemetry during 1988 and 1989. *Scottish Fisheries Research Report*, 50, 34 p.
- MARTY A., 1984. Le saumon dans les bassins de l'Adour et de la Nivelle. Rapport d'étude. Conseil Supérieur de la Pêche, Délégation régionale Midi-Pyrénées, 187 p.
- MILNER N.J.(ed.), 1990. Fish movements in relation to fresh water flow and quality. Proceedings of Atlantic Salmon Trust/Wessex Water Workshop, Pitlochry, Atlantic Salmon Trust, 51 p.
- SMITH I.P., SMITH G.W., 1997. Tidal and diel timing of river entry by adult Atlantic salmon returning to the Aberdeenshire Dee, Scotland. *J. Fish Biol.*, 50, 463-474.
- SMITH G.W., CAMPBELL R.N.B., MACLAINE J.S., 1998. Regurgitation rates of intragastric transmitters by adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during riverine migration. *Hydrobiologia*, 371/372, 117-121.
- SOLOMON D.J., STORRETON-WEST T.J., 1983. Radio-tracking of migratory salmonids in rivers : development of an effective system. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Directorate of Fisheries Research. *Fisheries Research technical Report*, 75, 11 p.
- STASKO A.B., PINCOCK D.G., 1977. Review of underwater biotelemetry, with emphasis on ultrasonic techniques. *J. Fish. Res. Board Can.*, 34, 1261-1285.
- WEBB J., 1989. The movements of adult Atlantic salmon in the River Tay. *Scottish Fisheries Research Report*, 44, 32 p.
- WEBB J., 1992. The behaviour of adult salmon (*Salmo salar* L.) in the River Tay as determined by radiotelemetry. *Scottish Fisheries Research Report*, 52, 19 p.