

鰻魚梯 (eel pass) 設計之回顧

張至維¹，曾萬年² 摘譯

1. 國立台灣大學漁業科學研究所

2. 國立台灣大學動物學系

引 言

鰻鱺屬 (*Anguilla*) 為河海洄游性魚類，其生活史包括柳葉魚 (*leptocephalus*)、玻璃鰻 (*glass eel*)、鰻線 (*elver*)、黃鰻 (*yellow eel*) 及銀鰻 (*silver eel*) 等五個階段。鰻魚在溯河洄游過程中，常因河道中的堤堰、暗渠及水閘等障礙，而無法進入河川中成長。過去 15 年來，因這些障礙物阻斷溯河洄游，已使得河川中的歐洲鰻的族群量顯著銳減 (White and Knights, 1994)。因此，1993 年聯合國糧農組織 (FAO) 所屬的歐陸漁業諮詢委員會 (EIFAC) 在國際鰻魚研討會上，提出有關如何利用魚梯來改善鰻魚洄游環境的構想 (EIFAC/FAO, 1993)。近年來，因河口地區鰻線的過度捕撈以及河川中水庫及攔沙壩的興建，台灣河川內的日本鰻也逐漸減少。為了恢復鰻類的生機，本文將介紹歐洲方面的魚梯設計及其效率，提供相關單位今後在河川魚類資源保育上之參考。

鰻的攀爬習性及其魚梯設計原理

鰻的體型細長，適合於水中石縫間活動，可藉攀爬不規則物體或水中植物而洄游到河川上游。一般而言，鰻只能稍微躍出水面，鰻線成長至 10 公分左右，能攀爬垂直的潮濕表面 (Skead, 1959)，但攀爬過程中有乾涸、溫度過高及被捕食等之危險，水流過急時還會被沖回到原點。

流速太快、亂流及漩渦等會妨礙幼鰻的洄游。鰻線在流速超過每秒 0.5 公尺的水

中即無法自由游動(Sorensen, 1951)。游泳能力隨成長而增大，大約長至10至15公分的幼鰻，能抵抗每秒1.5公尺的流速。流速太快時，幼鰻必須藉著攀爬粗糙的物體表面、藻類成長區，或纏繞於植物纖維上，才能洄游到上游區域(Tesch, 1977)。

根據上述鰻的習性，魚梯的設計需考慮下列原則：

- (1)使水流動以吸引鰻接近魚梯。
- (2)魚梯入口與出口的流速及流向。
- (3)水由魚梯向下流動之速度要適當，同時魚梯要配備草繩、結網或毛刷等物體供鰻攀爬。

設計時除了不同地點的水文特性之外，還要考慮鰻魚洄游時機及魚體大小等因素。例如玻璃鰻需靠海流輸送至河口域，鰻線則藉著漲潮進入河川內。歐洲鰻的玻璃鰻主要出現於4至6°C的大潮，次年第二次溯河洄游則在水溫16至17°C時。鰻通常不會持續往上游游，越往上游障礙物越多，其數目也就越少(White and Knights, 1994)。每個鰻魚梯的設計，除了考慮生物及水文因子外，潮汐控制、能源節約、管理及維持費用等，也需一併計算在內。

魚梯的種類

1. 天然魚梯 (Simple solutions and 'natural' pass designs)

河口區堤堰的高度，若低於大潮水位，或於適當時機可將閘門開啓，就不會阻礙鰻的溯河洄游，但往往不可行。最簡單的方法就是在這些堤堰上增加適當的粗糙表面，或在表面育成海藻以利鰻魚攀登。堤堰下緣，放置岩石或水泥塊等物體以及使海藻於該表面上生長，都可使原來光滑的表面變得可供鰻魚攀爬。天然障礙物的裂縫及孔洞亦適合鰻魚攀登，2公釐左右的縫隙適合玻璃鰻，4公釐則適合幼鰻，7至15公釐則適合20至40公分的黃鰻(Knights, 1982; Naismith, and Knights, 1990)。於魚梯出入口附近堆置石頭，可增加鰻魚進出魚梯的機會。除此之外，障礙物一邊斜緩、粗糙不平甚至延伸下緣與低潮位等高，亦可使鰻魚容易攀爬。減緩魚梯上緣流速並造成潮濕的上緣，即使水量大，鰻魚亦能順利上溯，這種原理亦可應用於較平滑的暗渠或涵洞。換言之，提供不規則表面、產生低流速的區域及潮濕的邊緣是改善天然魚梯最佳捷徑。

在較高、較陡的屏障、流速過急或是有人為漲退潮控制的情況下，就必須設置與障礙物分離旁路(by-pass)。該類旁路可設計為曲折狀迴路以減低梯度差，若攀爬路徑過長，則需附加一休息池(Fig. 1)。

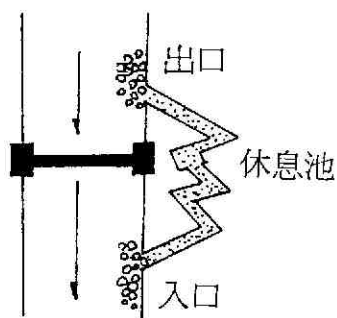


Fig.1 利用曲折旁路以便超越障礙物的天然魚梯設計。出入口附近堆置石頭增加鱖魚進出魚梯的機會。

2. 人工魚梯 (Constructed passes)

半天然的魚梯常不盡理想，所以必需另外設計附有攀爬物體的人工魚梯。人工魚梯內部皆需填充網狀或瓶刷狀攀爬媒質。歐洲及 Denmark 地區的管狀魚梯，大都採用垂直設置 (Fig. 2) (Dahl, 1991)，但傾斜 15 至 30 度較佳 (Legault, 1992)。梯中供攀爬的媒質容易被垃圾堵塞而且清理困難。Fig. 3 是紐西蘭 Matahina 水壩的一種抽水式管狀魚梯，魚梯的塑膠管架在壩壁上，水被抽到上方水箱中後順著管子流下，鱖則沿著潮濕的邊緣攀爬而上，這種設計適合於可攀爬陡坡的鱖線及小型幼鱖。

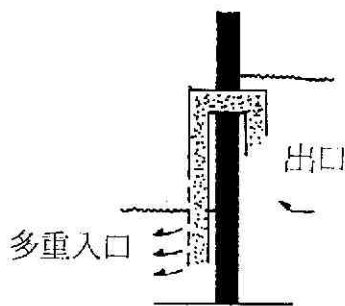


Fig.2 垂直式的管狀魚梯。魚梯內有填充攀爬媒質。

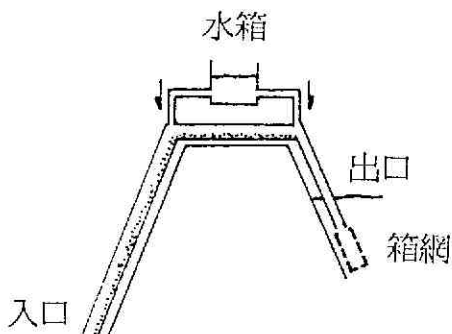


Fig.3 抽水式的管狀魚梯。魚梯架在壩壁上，從水箱流出的水，一方面順魚梯而入，一方面引導鱖魚進入箱網。

一般而言，可隨時打開檢查及清理的開放式魚梯比較符合實際需求。這類魚梯可避免樹葉堵塞，漂浮的樹葉尚可供鱖魚遮蔽，防止被鳥捕食。開放式魚梯可以任何型式及規模來設計，但必需使用強韌不易損壞的材質。它可用組合型的方式直接架設在

障礙物上或用螺絲、托架等以 15 至 30 度固定在其表面 (Legault, 1992)。若是在較高制之水壩結構體，魚梯則可設計為曲折狀 (Fig. 4)。魚梯入口的屏柵應避免垃圾進入及防止浮木的破壞。供攀爬的媒質需能容易清除及替換。但若以化纖網或石南屬植物等 (2) 天然物質做為攀爬媒質，引道基座設計成 U 型可提高鰻利用魚梯的機會。鰻除了纏繞自己在該物質上，也可通過其中及魚梯基座，或利用潮濕的邊緣攀爬而上。

使用扁平板上的刷子當作攀爬媒質時，板子要以小角度傾斜放置 (Fig. 5)。目前的商業用的魚梯設計，所採用的角度皆不超過 35 度。而當洄游時期時，板子上部邊緣質應高於預期最高水位以提供一個低流速的潮濕區。

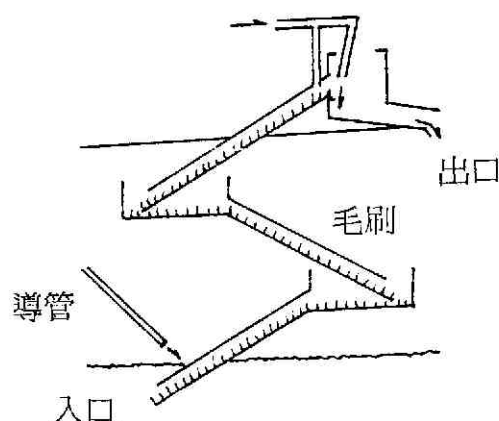


Fig.4 水道型的魚梯。障礙物上以毛刷為攀爬媒質的曲折狀魚梯。入口處以導管製造強水流吸引鰻魚進入。出口處提供向下水流幫助鰻魚離開。

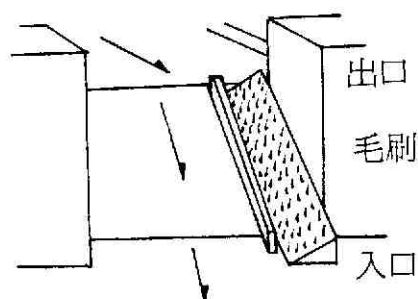


Fig.5 傾斜放置的魚梯。其攀爬媒質為毛刷，利用傾斜角度產生低流速之潮濕區。

2-1. 供攀爬的媒質 (Climbing media)

一些較老式的鰻魚梯所使用的物質為石南屬植物、灌木或稻草等做成的蓆子、繩索等 (Rigaud *et al.*, 1988)，但最近的設計則採用較強韌的化學合成纖維，茲分述如下：

(1) Geotextile mats

主要用於保護橋墩及河堤，材質有尼龍及合成纖維 (Fig. 6)。Dahl (1991) 建議採用 Enkamat，而相類似的尚有 Tensarmat，這些物質都是土木工程常用的材料。Geotextile mats 由不同厚薄及大小所組成 (以 20 公釐厚的 Enkamat 7020 為主)，提供鰻魚移動時攀爬之用。組成若過緻密易發生堵塞，且通過的鰻魚的體型也會受到限

制。因為這些圈圈的大小是固定的，某些等級的網目只允許體型較小鰻線的通過，但較大的幼鰻則不適用(White and Knights, 1994)。

(2) Horticultural netting

它不如 Geotextile 之堅硬、緻密，但很便宜(Fig. 7)。在英國的 Thames、Severn 及 Avon 等河流，以 20 公釐平方網目的尼龍箱網進行鰻魚洄游試驗，證明對各種體型的洄游鰻效果都很好(Naismith and Knight, 1988; White and Knight, 1994)。將這種材質結成繩狀，以塑膠繩鬆弛地固定於魚梯基底的塑膠導管上能發揮很好的效果。從直接觀察及錄影帶紀錄發現鰻魚很容易通過及攀登此類材質，藻類的成長或其他碎削物的堆積所造成的影響也很小。

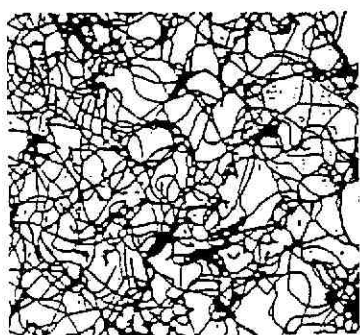


Fig.6 攀爬媒質之一，Geotextile mats。

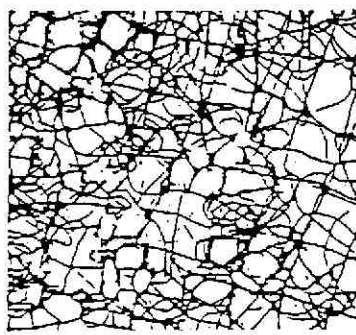


Fig.7 攀爬媒質之二，Horticultural netting。

(3) 毛刷(Brushes)

鰻魚可在毛刷的縫隙間游動及攀爬。有人以高速攝影分析 60 至 170 公釐大小的幼鰻在淺斜坡上游動的行為，發現鰻魚會在毛刷的界面間以波動運動方式在每秒 1.5 至 3 公尺的水流速度中往上攀登。Astroturf 型式的毛刷材質因毛刷邊緣過短、過硬，而且太過靠近使得鰻魚無法順利攀爬(White and Knights, 1994)。以往商品化的魚梯則是在聚酯(polyester)板上加上些人工合成材質的刷子(Fig. 8)。這些毛刷可設置在通道內壁(Figs. 4 and 5)而且容易清理，但價錢嫌貴。

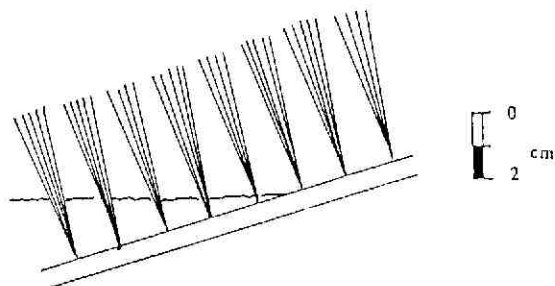


Fig.8 攀爬媒質之三，Brushes。

鰻會使身體捲曲於毛刷之間，然後以波浪狀的運動方式通過魚梯。一種典型的設計是由1公釐厚乘40至70公釐長的綠色聚酯毛刷，束集在基座為1000公釐乘400公釐乘10公釐大小的尼龍、聚丙烯(polypropylene)或聚氯乙烯(PVC)板上的5公釐的洞裡。毛束的間隔需考慮到鰻魚體型，如70公釐的間隔適合體長200公釐左右的鰻，140公釐則適合230公釐的鰻。若要同時符合各種體型的鰻，則可在同一刷板上設計各種不同間隔的組合，如Fig. 9 側面適合稚鰻，中間則適合鰻線。

不管使用何種材質做為攀爬媒質，鰻魚都要能全程通過魚梯才行，而且魚梯中每個單元的接點都需被覆蓋到，甚至延伸至魚梯的出入口外。

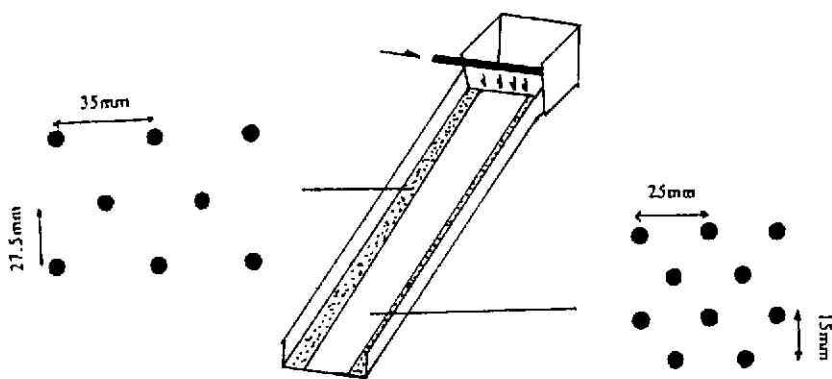


Fig.9 不同間隔的刷毛組合，適合零歲的鰻線及幼鰻。

2-2. 水的供給(Water supply)

大部份的魚梯都無法提供自然的水流，例如水力發電水壩的壩高都遠超過上方水位，從上方洩洪的水量及水流也不穩定，順流而下的垃圾或泥沙也可能損及魚梯。這時必須利用重力作用以虹吸管連接，並於入口加裝過濾器以及隨時檢查是否有堵塞及損壞的現象，才可達到穩定水流作用。若有電力供應，水還可被過濾後抽往魚梯上方來控制流速。鰻魚能藉著適當的媒質攀爬流速高達每秒3公尺的水流，流速低於每秒0.5公尺時鰻魚則停留不前。流速還可利用斜坡或圓切面管道來調節，以便產生低流速且潮濕的邊緣。在魚梯起始端安裝水平噴水也可產生吸引鰻魚的薄層水流。

2-3. 魚梯的出入口(Entry and exit to passes)

魚梯下方必須設計一個較強的水流以吸引鰻魚進入。若沒有天然水流，則可用引道製造一些強的水流來吸引鰻魚(Fig. 4)。

魚梯的入口應設置在水流下方，其基底需比預期的最低水位還要低。封閉式的箱型魚梯須有孔洞或水溝等使鰻魚進入(Fig. 2)，供攀爬的媒質亦需延伸至基底及每個入口處，但基部應避免延伸至流速過急或是渾濁的水團中，否則鰻就不會進入該入

口。在較平靜的水域中需將石塊堆放於基底牆邊或角落以引導鰻魚進入魚梯。供攀爬的媒質也要延伸至水流中，以便鰻魚攀爬附著 (Fig. 10)。

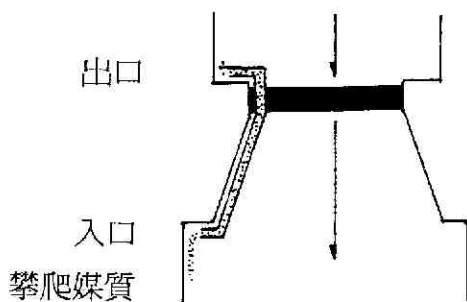


Fig.10 設置在牆邊的魚梯。入出口延伸至較平靜的水域以引導鰻魚進出。魚梯內填充攀爬的媒質。

急流中的魚梯，鰻魚無法往上游，這時要使魚梯及供攀爬的媒質延伸到較平靜的水域。任何調節牆和堤壩等都需附可供攀爬的媒質以利鰻魚洄游，或在不妨礙水利運作功能下設置填充攀爬媒質的管子使鰻魚通過。

吸管式或抽水式魚梯，最簡單的出口設計即是將攀爬媒質延伸到陡峭的平滑切面上，鰻魚才能離開該媒質順利到達上池，在該處若有向下的水流亦能幫助鰻魚離開 (Figs. 3 and 4)。魚梯上方出口處需設置合宜，讓鰻魚一離開魚梯就有適當的底質及掩蔽的水中植物，以免遭受獵食者捕食。

2-4. 陷阱 (Traps)

陷阱是屬於魚梯的一部份，可捕捉通過魚梯中的鰻魚，供研究其洄游及評估魚梯效率，捕獲的鰻魚也可再放流。陷阱通常是在抽水式魚梯的出口外設置一可動式箱網引導鰻魚進入 (Fig. 3)；或於重力式魚梯的通道上加入一平滑向下的導管，使鰻順著管壁滑落於預置的水槽中 (Naismith and Knights, 1988; White and Knights, 1994)；亦或在開放式魚梯的休息池中設置閘板使鰻魚無法向上游，再以魚網捕捉 (Tesch, 1977)，亦可在閘板前先放入一隱藏於水下可移動的箱網捕捉鰻魚。

3. 綜合型魚梯 (Combined passes)

除了鰻魚外，河川中還有其他魚類也需要魚梯才能洄游，所以要設計適合不同魚類的綜合型魚梯。綜合型魚梯可節省經費，但常常不能兩全其美。例如適合鮭魚的流速就不適合鰻魚。Baras 等 (1994) 發現流速若過低，鰻魚則能穿越平潭區，而攀爬魚梯邊緣繞著障礙物游動；但流速若過快，則攀爬的媒質又得延伸至魚梯狹道、邊緣

上。再者，供攀爬的管子亦需在低水位線以下穿越堤堰的結構體，這樣會影響該結構物的水利功能而且容易堵塞水流。

鰻魚梯可附加在其他魚梯中，例如藉由整合性的側邊通道 (Fig. 11) 或經由分隔開的通道等等，再加上供攀爬的媒質即能達到鰻魚梯的效果。

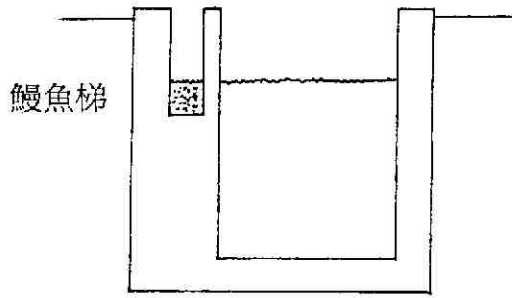


Fig.11 綜合型魚梯的剖面圖。附加在其他魚梯中內部有攀爬媒質。

魚梯效率 (Validation of eel pass designs and efficiencies)

大部分魚梯都很少評估其效率，原因是缺少魚梯建造前的調查資料。唯有在建造完成後，利用所設置的陷阱來研究其洄游的狀況。英國 Severn-Avon 河流中 6408 尾標識過的鰻魚中，3 年後在 15 個地點 24 個陷阱中共捕回了 226 尾 (White and Knights, 1994)。這偏低的回收率 ($< 2\%$) 與利用標識再捕捉方法所得的結果類似 (Baras *et al.*, 1994)。但是只有 5 尾鰻魚是經由魚梯而被捕獲的。顯示鰻魚的不定向洄游，部份鰻魚可不經由魚梯而能上溯至河流上游。

德國 Geesthacht 水閘設置後，導致上溯的幼鰻數目減少 (Tesch, 1977)。美國 Ontario 湖及其上游支流 St. Lawrence 河，在 Moses-Saunders 水壩設置魚梯後，河川上游的鰻漁業加入量顯著提高 (Liew, 1982)，而水壩下的鰻魚數目及平均年齡則立即下降，顯然未建造魚梯前該河流中的鰻魚洄游確實受到水壩的阻礙。由挪威 Imsa 河中魚梯的陷阱所捕獲的鰻線、稚魚及銀鰻的數量，顯示降海洄游 (emigration) 的成鰻數量與加入量之間有密切的相關性存在 (Vollestad and Jonsson, 1988)。北愛爾蘭 Bann 河流下游的魚梯可用以提高 Neagh 湖的漁業及在 Shannon 流域的漁獲量。這證明魚梯可提高河川中鰻魚的加入量。近幾年，歐洲許多河流因為沒有設置魚梯，以致鰻魚族群量都未達到預定的環境收容量 (carrying-capacity)，尤其鰻線的加入量已明顯下降。

(Naismith and Knights, 1992)。

因地點不同鰻魚利用魚梯的情形有很大的差異。Bann 河流每年是以噸計，但其他地區則只有數公斤的產量。1991 至 1993 年，Tewkesbury 地區平均每個魚梯每年所捕捉的鰻線高達 61,000 尾及稚鰻 25,000 尾。比利時離河口 230 公里處的 Meuse 地區，Denil 型魚梯亦捕捉到了平均體長 29.5 公分的鰻魚 9,400 尾 (Baras *et al.*, 1994)。上述例子都說明了鰻魚梯的功能。

結 語

台灣河川陡峭，水資源有限，爲了充分利用水資源提供民生用水及發電，河川內水壩及攔沙壩接連不斷，魚類的洄游嚴重受阻，族群因而減小，如何兼顧水資源開發及魚類資源保育，值得有關單位深思。既有的水壩應予以改善，以利鰻魚的溯河；擬新建者，更應考慮周全，暢通魚類洄游路線，以期恢復河川魚類資源往日生機。

註：本文原著爲 B. Knights and E. White (1994). A Review of Eel Passes. EIFAC/FAO working party on eels, Spain 1994. p1-11.

文 獻

Baras, E., Salmon, B. and Philippart, J. C. (1994). Estimation of migrant yellow eel stock in large rivers through the survey of fish passes. International Symposium and Workshop on Stock Assessment in Inland Fisheries. 11-15 April, 1994, University of Hull, England.

Dahl, J. (1991). Eel passes in Denmark; why and how. EIFAC/FAO Working Party on Eel, Dublin, 1991. Rome: EIFAC, FAO.

EIFAC (1993). Report of the Eighth Session of the EIFAC/FAO Working Party on Eel. Rome: EIFAC, FAO.

Knights, B. (1982). Body dimensions of farmed eels (*Anguilla anguilla* L.) in relation to condition factors, grading, sex and feeding. Aquacultural Engineering 1, 297-310. Legault, A. (1992). Etude de quelques facteurs de selectivite de passes a anguilles. Bulletin Francais de Peche et Pisciculture. 325, 83-91.

Liew, P. H. L. (1982). Impact of the eel ladder on the upstream migration eel

- (*Anguilla rostrata*) population in the St. Lawrence River at Cornwall: 1974-1978. In Proceedings of the 1980 North American Eel Conference, ed. K. H. Loftus, Ontario Fisheries Technical Report Series No. 4.
- Naismith, I. A. and Knights, B. (1988). Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. Journal of Fish Biology. 33 (Supplement A), 161-175.
- Naismith, I. A. and Knights, B. (1990). Studies of sampling methods and of techniques for estimating populations of eels, *Anguilla anguilla* L.. Aquaculture and Fisheries Management. 21, 357-367.
- Rigaud, C., Fontanelle, G. Gascuel, D. and Legault, A. (1988). Le franchissement des ouvrages hydrauliques par les anguilles (*Anguilla anguilla*): Presentation des dispositifs installes en Europe. Les Publications du Departement d'Halieutique No. 9. 147pp. ENSA de Rennes, France.
- Skead, C. J. (1959). The climbing of juvenile eels. Piscator 13, 74-86.
- Sorensen, I. (1951). An investigation of some factors affecting the upstream migration of elvers of the American eel in a Rhode island brook. Transactions of the American Fisheries Society 115, 258-268.
- Tesch, F. W. (1977). The Eel: Biology and Management of Anguillid Eels. London, Chapman and Hall.
- Vollestad, L. A. and Jonsson, B. (1988). A 13-year study of the population dynamics and growth of the European eel *Anguilla anguilla* in a Norwegian river: evidence for density-dependent mortality and development of a model for predicting yield. Journal of Animal Ecology 57, 983-997.
- White, E. M. and Knights, B. (1994). Elver and eel stock assessment in the Severn and Avon. Report to National Rivers Authority, R&D Project 256/13/ST. NRA, Bristol, England. EIFAC, PAS. 94
-