

Article

« Les modèles numériques des microhabitats des passons : application et nouveaux développements »

Y. Souchon, F. Trocherie, E. Fragnoud et C. Lacombe

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 2, n° 4, 1989, p. 807-830.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705056ar>

DOI: 10.7202/705056ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Les modèles numériques des microhabitats des poissons :

application et nouveaux développements

Instream flow incremental methodology :
applicability and new developments

Y. SOUCHON, F. TROCHERIE, E. FRAGNOUD, C. LACOMBE

RÉSUMÉ

L'estimation des stocks de poissons que peut abriter un secteur de cours d'eau non pollué nécessite le calcul de sa capacité d'accueil en terme d'espace et de nourriture. Le premier volet a donné lieu aux Etats-Unis à la mise en place de modèles de comportement de différentes espèces de poissons en fonction de variables physiques et de modèles hydrauliques décrivant l'évolution temporelle de ces variables.

Les hypothèses sous-jacentes sont discutées. Une modification du calcul de la perte de charge linéaire est préconisée pour le modèle hydraulique dans le cas des rivières à truites, et l'utilisation de méthodes multivariées est proposée pour décrire avec une meilleure fiabilité les relations entre densités de poissons et variables physiques des cours d'eau.

Quelques cas d'application illustrent l'intérêt de cette démarche pour répondre à des questions posées par les gestionnaires, tant en matière de prévision des impacts piscicoles des aménagements que d'optimisation des repeuplements.

Mots clés : *Poisson, microhabitat, débit réservé, plan de gestion piscicole.*

SUMMARY

When evaluating the potential fish stock that an unpolluted reach of a stream can accommodate, the load capacity with regard to space and food available must be assessed. It is for this purpose that the Instream Flow Incremental Methodology has been developed in the United States.

The assumptions on which behavioural and hydraulic models are based are discussed and modifications are suggested to improve the efficiency of this methodology.

The use of the Manning equation to compute the energy loss is misleading in the case of trout streams and results from simulation are more reliable when using resistance equations designed for mountain rivers.

For biological monitoring, multivariate data analysis is an interesting alternative to drawing one-dimensional preference curves. Qualitative variables can be used and redundancy or dependence between parameters no longer distorts the results. The relations between physical variables of streams and a probability of the presence of fish are estimated with greater accuracy.

Examples of the application of this methodology are presented with a view to assessing the effects of water abstraction on fish populations and to optimizing the restocking of trout streams.

Key-words : *Fishes, microhabitat, minimum flow, fisheries management scheme.*

Si, sous l'impulsion du professeur LEGER (1909, 1945), des études importantes ont été consacrées dès le début de ce siècle à l'évaluation des capacités de production piscicole des cours d'eau et au calcul de la valeur économique correspondante, cet aspect de la connaissance de nos milieux aquatiques a été quelque peu délaissé à la suite de la dernière guerre mondiale. Les préoccupations principales liées à l'essor démographique et industriel qui s'en est suivi concernaient l'alimentation en eau de la population humaine et l'évacuation des déchets.

Aussi, tandis qu'en matière législative la loi sur l'eau de 1964 traduisait cette orientation, les travaux des centres d'hydroécologie appliquée s'orientaient principalement vers la recherche d'indices de qualité de l'eau et d'essais écotoxicologiques permettant de cerner rapidement le degré de nocivité des effluents.

Le rôle important joué par les Agences Financières de Bassin pour le développement des stations d'épuration des eaux a permis de contre-carrer rapidement la dégradation des milieux aquatiques et de redonner l'accent à leur exploitation biologique et utilisation récréative.

Cette évolution a été consacrée par la loi du 29 juin 1984 relative à la pêche en eau douce et à la gestion des ressources piscicoles. Les modifications principales du Code Rural correspondantes concernent l'obligation pour le titulaire du droit de pêche de définir un plan de gestion de la partie de cours d'eau qu'il exploite, et la prise en compte des problèmes posés en terme d'habitat piscicole par les aménagements.

Il importe maintenant de faire le point sur les outils techniques permettant l'application de telles dispositions.

Si en France LEGER s'était à son époque principalement orienté vers l'estimation de la valeur nutritionnelle d'un cours d'eau (densité des proies disponibles pour le poisson) pour en déduire ses potentialités piscicoles, une approche toute différente s'est développée récemment aux Etats-Unis pour répondre à la nécessité de déterminer les valeurs de débit réservé à l'aval des aménagements hydroélectriques. C'est ainsi que BOVEE et MILHOUS (1978) ont cherché à cerner les besoins de différentes espèces de poissons en terme d'espace et à calculer pour chaque cours d'eau étudié l'évolution de sa capacité d'accueil physique par rapport à ces espèces. Cette démarche, dénommée "*simulation physique de l'habitat*", ou "*méthode des microhabitats*", ou encore "*méthode par accroissement*", est très utilisée dans les pays anglo-saxons mais son application en France est très récente. Son principe est succinctement rappelé ici, quelques modifications sont proposées pour contourner certaines hypothèses trop pénalisantes inhérentes à cette méthode, et deux exemples de son application permettent de cerner son intérêt pour les études d'impact préalables aux aménagements et pour orienter les actions halieutiques.

I - LA MÉTHODE DES MICROHABITATS : PRINCIPE - HYPOTHESES - CRITIQUES

Cette méthode consiste à coupler :

- d'une part un modèle biologique traduisant les relations entre la présence ou la densité relative d'un stade donné d'une espèce de poisson et les valeurs de plusieurs variables physiques caractéristiques de son habitat ;
- d'autre part un modèle hydraulique permettant de reconstituer à partir d'une à trois campagnes d'observations sur un cours d'eau les valeurs des variables physiques retenues, quel que soit le débit transitant dans le secteur étudié.

De façon pratique, les mesures sont effectuées le long de transects choisis pour traduire au mieux les conditions morphodynamiques représentées sur le secteur de cours d'eau étudié.

Chaque observation est considérée comme valable sur l'étendue d'une zone (appelée "*cellule*") de quelques mètres carrés située de part et d'autre du transect correspondant.

Il est alors possible, en utilisant les modèles biologique et hydraulique, d'exprimer pour tout débit la capacité d'accueil physique d'une partie de cours d'eau vis-à-vis d'un stade d'une espèce de poisson sous la forme :

- d'une surface pondérée utile, en sommant les surfaces de chaque cellule, pondérées par un coefficient variant localement entre 0 et 1 en fonction de l'adéquation des conditions morphodynamiques par rapport aux exigences du poisson ;

- d'une valeur d'habitat, représentant la valeur de ce coefficient, soit locale au niveau d'une cellule, soit moyenne en calculant le rapport entre surface pondérée utile et surface mouillée de l'ensemble de la portion de cours d'eau étudiée.

Cette démarche très novatrice permet de proposer une estimation prévisionnelle des effets de toute modification, naturelle ou artificielle, du régime hydrologique du cours d'eau, et de déceler, en fonction des variations saisonnières, les périodes et les stades les plus critiques dans le développement d'une population de poissons.

Elle présente donc un grand intérêt, qui s'est traduit par de nombreux travaux qui lui ont été consacrés et également par de multiples controverses dans des revues ou congrès internationaux (MATHUR *et al.*, 1985 ; MATHUR, 1986 ; ORTH et MAUGHAN, 1986 ; ORTH, 1987, SCOTT et SHIRVELL, 1987).

Une bonne part des critiques adressées à l'égard de cette méthode est liée à une volonté détractrice trop systématique.

En revanche, certaines sont très fondées, tout particulièrement celles émises par des auteurs ayant largement appliqué cette méthode.

Citons parmi ces critiques ou plutôt ces doutes :

□ Au niveau de la modélisation hydraulique :

1. L'équation de CHEZY décrivant la perte de charge linéaire est utilisée par BOVEE et MILHOUS (1978) dans la formulation proposée par MANNING. Or l'hypothèse de la constance du coefficient de MANNING quel que soit le débit n'est pas vérifiée, en particulier dans les cours d'eau où la dimension des éléments du substrat est du même ordre de grandeur que la hauteur d'eau.
2. Le modèle hydraulique utilisé est un modèle unidimensionnel fonctionnant en régime fluvial : la ligne d'eau est reconstituée pas à pas à partir d'une section de contrôle depuis l'aval vers l'amont. Deux questions se posent alors :
 - dans les cours d'eau où la pente atteint 4 voire 5 %, la ligne d'eau est-elle toujours contrôlée par l'aval ?
 - la redistribution transversale des vitesses, à partir de la connaissance d'une vitesse moyenne, d'une cote et d'une pente de ligne d'énergie pour une section donnée du cours d'eau, est-elle valide en utilisant un coefficient de MANNING localisé ?
3. L'évolution au cours d'un cycle hydrologique des capacités d'accueil piscicoles d'un cours d'eau peut *a priori* se déduire d'une seule campagne de mesures. Toutefois, ceci suppose que la morphologie du lit ne change pas, et que le substrat reste en place toute l'année. Cette hypothèse paraît devoir être remise en question.

□ Au niveau de la modélisation biologique :

1. La hauteur d'eau, la vitesse moyenne du courant sur une verticale et la taille des éléments du substrat sont les trois seules variables retenues pour décrire le comportement du poisson par rapport à son environnement physique.

Sont-elles pertinentes, suffisantes et interviennent-elles de façon indépendante dans le choix du poisson ?

Le comportement du poisson est-il également invariant quelle que soit la saison ?

Ces hypothèses semblent infirmées par plusieurs études.

Ainsi, ORTH et MAUGHAN (1982) montrent que, pour certaines espèces, hauteur et vitesse agissent en interaction.

De même, BACHMAN (1984) souligne l'importance des gradients de vitesse dans la sélection de postes de "chasse" de la truite fario.

Enfin, CUNJAK et POWER (1986) décrivent les différences de comportement de certains salmonidés en fonction de la saison.

2. Les courbes de préférence données par BOVEE (1982), établies à partir de la bibliographie, d'avis d'experts, d'observations de terrain sont calées artificiellement entre 0 et 1, et les fonctions correspondant à chaque variable sont multipliées pour calculer une fonction globale de préférence d'une espèce par rapport à un "micro-habitat". Est-ce que ce procédé empirique est optimal pour traduire le comportement du poisson ?

□ A un niveau plus général :

1. BOVEE (1982) fait l'hypothèse que le développement d'une population de poissons est limité par la surface pondérée utile minimale parmi les valeurs correspondant aux différents débits moyens mensuels d'un secteur de cours d'eau, et ce pour le stade apparaissant comme le plus critique sur ce secteur.

Une relation linéaire entre la biomasse de poissons de ce stade et la surface pondérée utile devrait alors être mise en évidence.

Or cela n'apparaît pas clairement dans les études déjà entreprises à ce sujet (LOAR, 1985 ; SCOTT et SHIRVELL, 1987). Cette hypothèse est d'ailleurs en contradiction avec la démarche de LEGER, qui a toujours privilégié la valeur nutritive des cours d'eau (nature et importance des peuplements d'invertébrés benthiques en place, et des apports exogènes) dans l'estimation des potentialités de production piscicole des cours d'eau.

Certaines observations précises montrent d'ailleurs que la quantité de nourriture disponible est un facteur plus important que le nombre de zones de refuge dans le comportement d'émigration de certains salmonidés (WILZBACH, 1985).

2. La méthode des "microhabitats" *stricto sensu* ne tient pas compte du contexte général du cours d'eau.

L'introduction de la température comme paramètre intervenant dans le calcul de la surface pondérée utile a été proposé par BOVEE (1982), et celle de paramètres chimiques par HERRICKS et BRAGA (1987).

Que valent les courbes proposées par ces auteurs ?

D'autre part, la méthode des "microhabitats" est principalement utilisée dans les prévisions d'impact des aménagements hydroélectriques. La modification éventuelle des modalités de transport solide à l'aval d'un barrage (érosion régressive, dépôt de fines) n'est aucunement pris en compte par cette démarche et nécessite une approche complémentaire.

Enfin, il importe de tenir compte de la dynamique du cours d'eau (changement de profil en long ou en travers) en fonction des épisodes hydrologiques conditionnant sa morphologie.

3. Quelle est la représentativité d'une station pour décrire le "fonctionnement" d'un secteur de cours d'eau par rapport à une population de poissons ?

Comment évaluer les échanges entre zones favorables à la reproduction et zones favorables à la croissance ?

2 - LA MÉTHODE DES MICROHABITATS : VALIDATION - PROPOSITIONS

L'application de la méthode des microhabitats a été tentée sur des secteurs de cours d'eau à truites peu influencés par l'activité humaine, tout particulièrement la pêche, et présentant *a priori* une valeur nutritionnelle voisine (bassins versants de type forestier ou pastoral, biomasse d'invertébrés benthiques comprise entre 1,5 et 3 g/m² en poids sec formolé).

Les caractéristiques générales de ces secteurs sont présentées au tableau 1.

Le programme informatique de calcul hydraulique a été mis au point par BAUME et POIRSON (1984), à partir de la formule de perte de charge linéaire de MANNING. Le programme fonctionne en régime fluvial, et calcule des hauteurs et vitesses moyennes critiques si le nombre de Froude égale l'unité.

L'application d'un tel programme à plusieurs cours d'eau, de pente comprise entre 1 et 3 ‰, donne des écarts relatifs pouvant atteindre 50 ‰ entre tirant d'eau modélisé et tirant d'eau observé, les débits correspondant respectivement au calage du coefficient de MANNING et à la modélisation étant dans un rapport maximal de 1 à 3.

La modification de la formule de perte de charge est apparue nécessaire, la résistance frontale à l'écoulement liée aux éléments les plus grossiers du substrat devant être prise en compte de façon complémentaire à la rugosité de fond.

La formule de LIMERINOS, validée par plusieurs auteurs (BATHURST, 1982, 1986 ; HEY, 1982 ; JARRETT, 1984) donne des résultats satisfaisants, les écarts relatifs entre tirants d'eau modélisé et observé ne dépassant plus 10 ‰. Il apparaît également que la reconstitution de la ligne d'eau de l'aval vers l'amont ne pose pas de problème, le nombre de Froude moyen sur chaque section restant toujours inférieur à 1, même si l'écoulement est par endroits de type torrentiel.

Tableau 1. - Caractéristiques générales des sites étudiés.

Table 1. - General characteristics of study sites.

REGION	COURS D'EAU	LOCALISATION DE LA STATION	Altitude (m)	Pente (‰)	Dureté (mg/l Ca ⁺⁺)
ALPES					
Massif du Vercors	La Vernaison	Les Petits Goulets	275	10	72
	Le Bez	Amont Châtillon en Diois	570	6	57
Préalpes drômoises	La Drôme	Aval Valdrôme	750	11	81
	Le Roubion	Amont Crupies	500	13	91
	L'Ouvèze	Aval Saint-Auban	580	6	81
Plaines alluviales du Bas Dauphiné					
Massif des Ecrins	La Galaure	La Pichadou	380	7	60
	La Séveraisse	Le Casset	1150	24	30
	Le Drac Blanc	Les Gondouins	1300	23	30
JURA					
	La Semine	Amont Moulin Neuf	600	24	45
	Le Tacon	Amont Ruisseau de Malaval	540	40	49
MASSIF CENTRAL					
Massif de l'Aubrac	La Boralde de Flaujac	Aunac	550	11	8
	La Boralde de Saint-Chely	La Rozière	410	7	8

La redistribution des vitesses sur une section a été calculée en utilisant localement cette même formule, le calage s'effectuant par l'estimation de coefficients de résistance locaux à partir d'une mesure effective des vitesses et hauteurs d'eau ponctuelles pour un débit donné.

Le substrat est décrit en repérant la classe de taille des éléments les plus grossiers représentant au moins 10 % de la surface observée ainsi que la ou les classes de taille des éléments dominants. Les limites des classes de taille et le protocole de description sont précisés par MALAVOI (1986).

La validation globale de cette procédure a été effectuée sur l'ensemble des cours d'eau étudiés, pour lesquels au moins deux campagnes d'observations physiques ont été réalisées.

L'écart relatif entre la valeur d'habitat modélisée à partir d'une campagne de mesures et celle observée à la deuxième campagne n'a jamais dépassé 20 % pour les stades adulte, juvénile et alevin de la truite fario. En revanche, l'évaluation de la valeur d'habitat pour la reproduction est extrêmement sensible à toute légère variation des paramètres physiques mesurés et la modélisation de cette valeur engendre des écarts relatifs pouvant atteindre 50 %.

Les résultats globaux de l'étude menée sur les secteurs de cours d'eau présentés plus haut aboutissent aux conclusions suivantes :

1. Les stades et la période critique pour le développement des populations de truites fario, en suivant les hypothèses formulées par BOVEE, sont systématiquement le stade adulte et la période d'étiage.
2. Le rapport entre les biomasses de truites fario de taille supérieure à 18 centimètres et la surface pondérée utile est en moyenne de 58 g/m², à rapprocher de la valeur de 65 g/m² proposée par BOVEE (1982).
3. La variabilité de ce rapport est nettement diminuée en utilisant des courbes de préférence de la truite fario adulte vis-à-vis de la hauteur d'eau et de la granulométrie du substrat calées d'après les observations réelles effectuées dans deux cours d'eau du Jura (FRAGNOUD, 1987). Celle correspondant à la hauteur d'eau est semblable à celles proposées par SABATON (1987) à partir d'avis d'experts et d'échantillonnage par pêches électriques (figure 1).

Le coefficient de variation du rapport entre la biomasse de truites fario adultes et la surface pondérée utile prend les valeurs de 66 %, 41,5 % et 27 % en utilisant respectivement les courbes de BOVEE dans leur intégralité, une courbe de hauteur d'eau modifiée et deux courbes modifiées (hauteur d'eau et granulométrie).

4. L'utilisation de ce rapport moyen pour estimer, à partir des mesures physiques, la capacité d'accueil d'un cours d'eau vis-à-vis de la truite fario adulte, permet, en modifiant les courbes de BOVEE, d'obtenir pour les douze cours d'eau étudiés, un écart moyen relatif entre valeur estimée et valeur observée de 22 %, le maximum étant de 46 % (figure 2).

Les résultats des inventaires par pêche électrique sur une même station présentant une variation du même ordre de grandeur (écart moyen relatif entre biomasse extrême inventoriée et moyenne de 30 %, maximum de 60 %), le résultat fourni par la méthode de BOVEE modifiée est tout à fait satisfaisant.

Toutefois, la valeur du rapport entre biomasse et surface pondérée utile ayant été calée sur les douze cours d'eau concernés, la fiabilité de cette estimation ne peut être validée que sur un jeu de données indépendant.

Quoiqu'il en soit, la cohérence du modèle proposé par BOVEE transparaît au travers de la relation linéaire ($r = 0,85$) entre les biomasses de truites adultes et les valeurs d'habitat (rapport entre la surface pondérée utile critique et surface moyenne d'une station) (figure 3), la correction des courbes de BOVEE (1982) permettant que la droite d'ajustement passe par l'origine.

Il apparaît donc que la démarche de BOVEE est pertinente, mais qu'il convient de mieux caler les relations entre le comportement des poissons et les variables physiques. Ceci est encore plus important si l'on s'adresse à des cours d'eau abritant des peuplements de poissons cyprinico-sococoles, pour lesquels d'autres paramètres tels que la présence de végétation aquatique peut jouer un grand rôle.

En s'inspirant des travaux effectués en matière d'échantillonnage ponctuel des poissons tant par les Américains (ORTH et MAUGHAN, 1982) que par l'Université de Lyon (NELVA *et al.*, 1979 ; NELVA, 1985), en utilisant les propriétés de l'analyse factorielle des correspondances multiples dans la recherche de variables de synthèse, pour la description du milieu (PIALOT *et al.*, 1984 ; PIALOT, 1985) et en appliquant l'adaptation de cette analyse à des fins prévisionnelles proposée par CAZES (1980), il paraît possible d'établir des relations entre présence ou densité d'un stade donné d'une espèce par rapport à de nombreuses variables physiques en tenant compte des interactions entre les variables.

Cette approche a été expérimentée sur deux stations de la Seine au niveau de Bar-sur-Seine (SOUCHON *et al.*, 1987).

Respectivement 28 et 38 zones de quelques mètres carrés ont été prospectées par la pêche électrique et les caractéristiques suivantes ont été notées (en regard de chaque modalité figure le code utilisé dans le tableau 2).

- la position	rive,	POSR
	chenal ;	POSC
- le faciès	radier,	FACR
	mouille,	FACM
	plat,	FACP
	autres (cascades, "baignoires") ;	FACA
- la hauteur d'eau ;		
- la vitesse du courant moyenne ;		
- le type de substrat dominant	tuffs,	SUBT
	blocs,	SUBB
	pierres et cailloux,	SUBG
	sédiments fins (sable, graviers) ;	SUBF

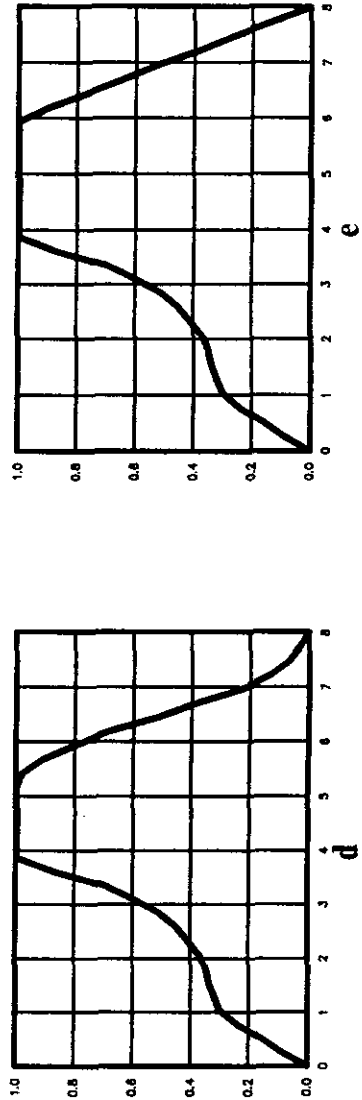
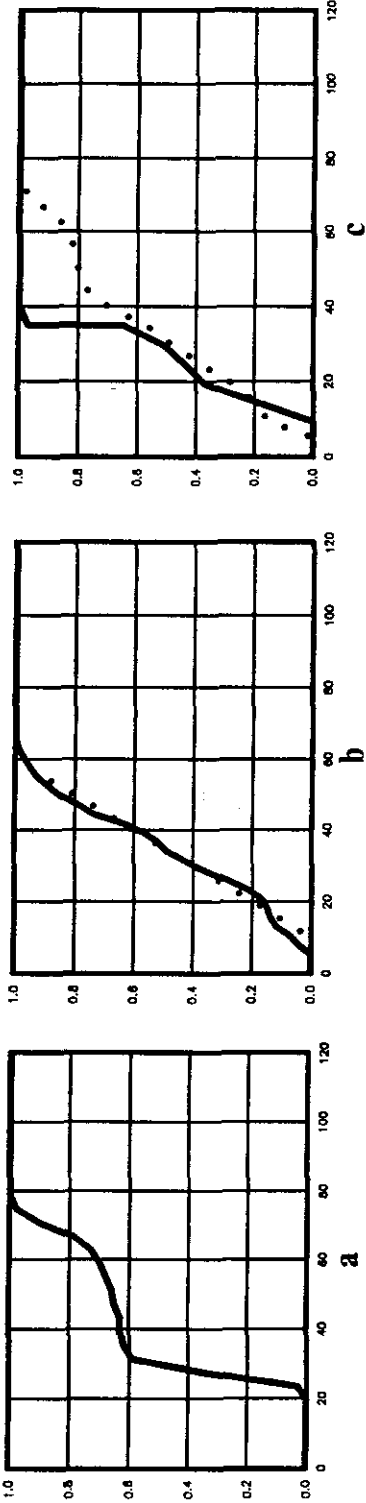


Figure 1. - Courbes de préférence de la truite fario adulte en fonction :

. de la hauteur d'eau (cm)

1a	1b	1c
d'après BOVEE (1982)	d'après FRAGNOUD (1987)	d'après SABATON (1987)
	—— courbe expérimentale	—— courbe expérimentale
	---- courbe ajustée	---- avis d'experts

. de la granulométrie

1d	1e
d'après BOVEE (1982)	d'après FRAGNOUD (1987)

Code d'après MALAVOI (1987)

1	2	3	4	5	6	7	8
Litière	Argile-limon	Sable	Graviers	Cailloux	Pierres	Blocs	Dalles

Figure 1. - Preference curves of brown trout with reference to :

. water depth (cm)

1a	1b	1c
based on BOVEE (1982)	based on FRAGNOUD (1987)	based on SABATON (1987)
	—— experimental curve	—— experimental curve
	---- adjusted curve	---- data from experts

. substrate size

1d	1e
based on BOVEE (1982)	based on FRAGNOUD (1987)

Code based on MALAVOI (1987)

1	2	3	4	5	6	7	8
Organic-detritus	Clay	Sand	Gravel	Cobbles	Rubbles	Boulders	Bedrock

- les abris (caches) occasionnés par
 - des blocs, BLO+
 - des embâcles, EMB+
 - des sous-berges ou des chevelus racinaires, SBE+
 - un contre-courant ; TUR+
- le type de végétation
 - des algues, VEAL
 - des mousses, VEMO
 - des mousses avec algues, VEAM
 - absence de végétation, VEGO

Les variables physiques quantitatives ont été découpées en classes :

- . pour la hauteur d'eau
 - 0 à 50 cm HAU1
 - 50 à 100 cm HAU2
 - > 100 cm HAU3
- . pour la vitesse du courant
 - 0 à 12 cm/s VIT1
 - 12 à 30 cm/s VIT2
 - > 30 cm/s VIT3

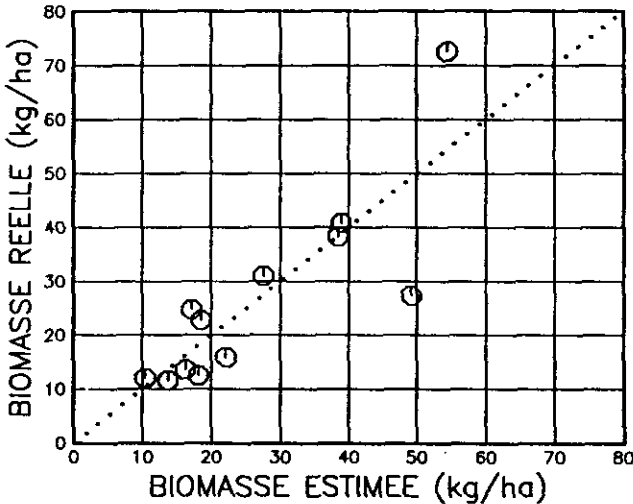


Figure 2. - Estimation des biomasses de truites fario adultes d'après les valeurs d'habitat obtenues sur 12 cours d'eau (méthode de BOVEE corrigée).

Figure 2. - Assessment of biomass of adult brown trout populations based on habitat suitability of 12 streams (BOVEE's method with modifications).

X.axis : estimated biomass (kg/ha)

Y.axis : observed biomass (kg/ha)

L'analyse factorielle du sous-tableau de BURT croisant les modalités présence et absence des six espèces principalement capturées avec les modalités des variables physiques permet de discriminer efficacement avec un faible nombre d'axes factoriels la présence et l'absence des différentes espèces, comme le montre la position des ellipses de disper-

sion des zones prospectées, projetées en supplémentaires sur les premiers axes de l'analyse (figure 4).

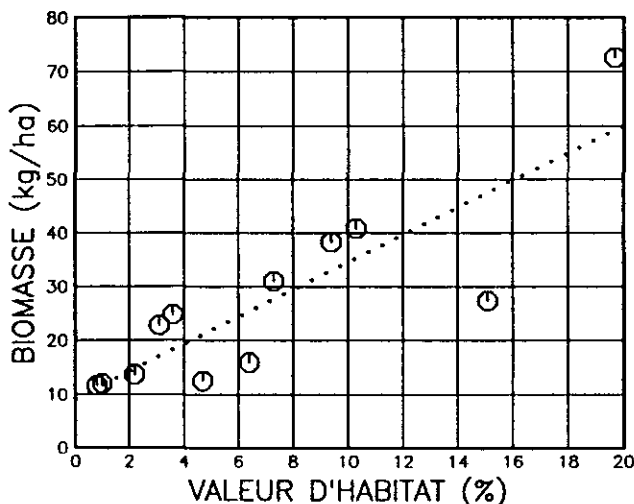


Figure 3. - Relation entre biomasse de truites fario adultes et valeur d'habitat de 12 cours d'eau (méthode de BOVEE).

Figure 3. - Relationship between biomass of adult brown trout populations and habitat suitability of 12 streams (BOVEE's method).

X.axis : habitat suitability (%)

Y.axis : biomass (kg/ha)

La discrimination entre zones favorables et défavorables pour chaque espèce peut donc s'effectuer à partir des premières coordonnées factorielles de cette analyse.

En utilisant une des formules de transition de l'analyse factorielle des correspondances, il est alors possible de calculer pour chaque espèce des coefficients correspondant à chacune des modalités des variables physiques, et d'attribuer à chaque zone un potentiel favorable ou défavorable selon que la somme des coefficients des modalités qu'elle respecte est positive ou négative (tableau 2).

Par exemple un point situé en rive (POSR) dans une mouille (FACM) avec une forte hauteur d'eau (HAU3), une vitesse moyenne de courant (VIT2), un substrat de tuffs (SUBT), des caches pour juvéniles (ABJ+) et pour adultes (ABA+), des abris sous blocs (BLO+), pas de sous-berges (SBEO) ni de turbulences (TURO), des embâcles (EMB+) et des algues (VEAL) est considéré comme très favorable à la présence de truites fario adultes (TRF) et nettement défavorable à la présence de chabots (CHA), la somme des coefficients correspondant aux différentes modalités précitées des variables physiques valant respectivement +2,5366 et -1,5845.

La discrimination ainsi calée sur les deux stations prospectées permet de classer correctement en moyenne 72 % des zones pour les six espèces étudiées. Le résultat concernant certaines espèces comme la loche franche est particulièrement performant (supérieur à 80 %), d'autres espèces comme le barbeau donnent un résultat plus médiocre (62 %) dans la

mesure où le faible nombre de poissons échantillonnés n'a pas permis de séparer alevins et adultes, dont le comportement est de toute évidence différent.

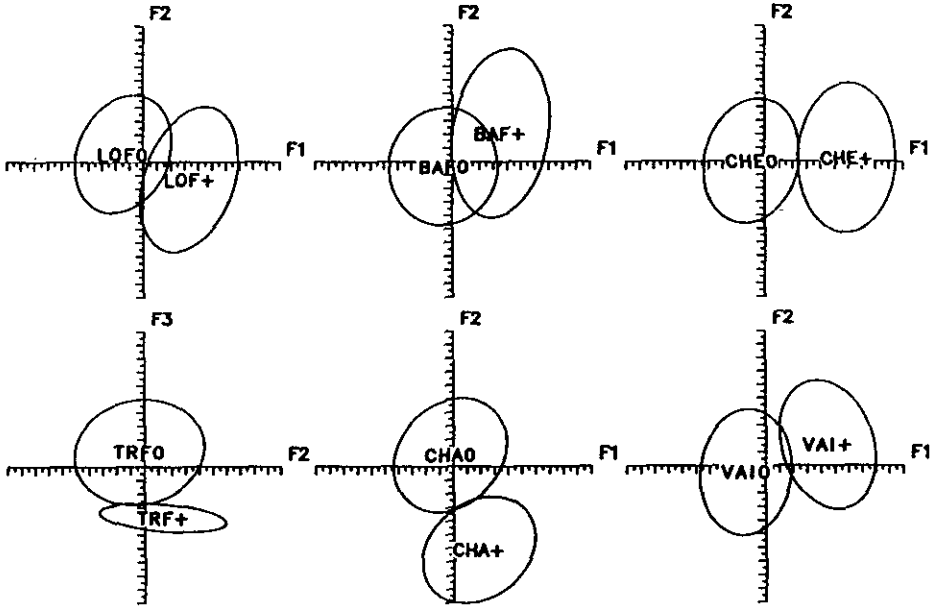


Figure 4. - Discrimination de zones favorables et défavorables à plusieurs espèces de poissons par une analyse factorielle des correspondances.

Figure 4. - Discriminant ordination by correspondence analysis of suitable and unsuitable areas with reference to fish species.

Code espèces <i>Species code</i>	Nom français <i>French name</i>	Nom anglais <i>English name</i>	Nom scientifique <i>Scientific name</i>
BAF	Barbeau fluviatile	Barbel	<i>Barbus barbus</i>
CHA	Chabot	Sculpin	<i>Cottus gobio</i>
CHE	Chevesne	Chub	<i>Leuciscus cephalus</i>
LOF	Loche franche	Loach	<i>Nemacheilus barbatulus</i>
TRF	Truite fario	Brown trout	<i>Salmo trutta fario</i>
VAI	Vairon	Minnnow	<i>Phoxinus phoxinus</i>

0 : espèce absente
absent species

+ espèce présente
present species

Ainsi, ce type de méthode est sans nul doute susceptible d'améliorer la démarche proposée par BOVEE, en remplaçant les fonctions de préférence issues d'analyses monovariées par des coefficients élaborés à la suite d'une discrimination ou mieux (en se référant à des densités de

poissons) d'une régression multiple sur facteurs d'une analyse factorielle construite à partir de l'étude des correspondances multiples.

Tableau 2. - Coefficients permettant la discrimination entre la présence et l'absence des différentes espèces de poissons, à partir des modalités des variables physiques décrites.

Table 2. - *Coefficients of discrimination between presence and absence of various species of fish, with reference to classes of physical variables.*

	TRF	CHA	VAI	LOF	BAF	CHE
POSR	0.0814	-0.1673	0.4293	0.1823	0.3110	0.3670
POSC	-0.0578	0.1056	-0.2777	-0.1168	-0.1976	-0.2338
FACR	0.3677	0.2610	-0.3675	-0.2883	-0.5399	-0.6320
FACH	0.1537	-0.5884	-0.3038	-0.4654	-0.1447	-0.4765
FACP	-0.3891	0.2503	0.4733	0.5469	0.4692	0.7992
FACA	-0.0424	1.0778	0.8352	0.9355	0.3346	0.9805
HAU1	-0.5069	0.3818	0.1886	0.4589	0.3127	0.6054
HAU2	0.12550	-0.1675	-0.0448	-0.1901	-0.1278	-0.2510
HAU3	0.6029	-0.5867	-0.4271	-0.7227	-0.4826	-0.9398
VIT1	-0.1386	-0.1098	0.5355	0.3584	0.4937	0.6458
VIT2	0.0513	-0.2748	-0.1360	-0.2054	-0.0520	-0.2011
VIT3	0.0627	0.4820	-0.4384	-0.1412	-0.4937	-0.4731
SUBT	0.2178	0.0729	-0.0297	-0.0798	-0.1616	-0.1877
SUBB	0.3433	0.1737	0.0497	-0.0430	-0.2009	-0.1916
SUBG	-0.3557	-0.1150	-0.2461	-0.0566	0.0499	0.0038
SUBH	-0.9530	-0.4673	0.7108	0.6673	1.1676	1.4065
ABJ0	-0.1952	-0.3333	-0.2676	-0.2122	0.0049	-0.1568
ABJ1	0.1673	0.2916	0.2385	0.1899	0.0008	0.1443
ABJ2	-0.6138	-0.1460	-0.2614	0.0253	0.1897	-0.1786
ABJ3	0.4758	0.1110	0.2064	-0.0181	-0.1438	-0.1349
ABJ4	-0.1362	-0.3968	-0.0632	-0.1277	0.1374	0.0041
BL0+	0.1475	0.4439	0.0730	0.1464	-0.1493	0.0015
SBE0	-0.0574	-0.0417	-0.1099	-0.0623	-0.0365	-0.0736
SBE1	0.3017	0.2211	0.6208	0.3555	0.2222	0.4311
TUR+	0.0592	-0.1426	-0.0380	0.0988	-0.0215	-0.0953
TUR-	-0.6243	1.4051	0.3894	0.9992	0.2447	0.9848
EMBO	-0.1302	0.0616	-0.1945	-0.0505	-0.0854	-0.0975
EMR+	0.3946	-0.2003	0.6111	0.1619	0.2783	0.3166
VEGO	-0.2504	-0.6811	-0.3157	-0.3451	0.0952	-0.1937
VENO	-0.2010	-0.2302	0.2519	0.1590	0.3558	0.3907
VEAL	0.2425	-0.5026	-0.4105	-0.5384	-0.2942	-0.6457
VEAM	0.0604	0.3418	0.1105	0.1686	-0.0463	0.0968

Un tel travail est actuellement adapté pour décrire le comportement de la truite fario à partir d'échantillons ponctuels d'une rivière de l'Aveyron.

Quant à la représentativité d'une station par rapport à un secteur de cours d'eau, un travail important est mené actuellement en collaboration avec le Laboratoire de Géographie de l'Université de Lyon III pour guider, à partir de photographies aériennes et de variables géomorphologiques globales le choix du nombre et de l'emplacement des stations devant être étudiées pour comprendre le fonctionnement biologique d'un cours d'eau.

3 - LA MÉTHODE DES MICROHABITATS : CAS D'APPLICATION - PERSPECTIVES

3-1 Détermination d'un débit réservé

La méthode des microhabitats permet d'étudier cas par cas l'évolution de la capacité d'accueil des cours d'eau vis-à-vis des poissons lors d'une réduction artificielle du débit.

Elle constitue un complément indispensable d'approches beaucoup plus grossières comme celle de TENNANT (1976) qui ne tient pas compte de particularités locales mais donne des recommandations globales sur les débits à respecter dans les cours d'eau, exprimés en pourcentage du module.

Cette dernière démarche a inspiré le texte de l'article 410 de la loi du 29 juin 1984 relative à la pêche en eau douce et à la gestion des ressources piscicoles, qui prévoit de respecter un débit minimal de 10 % du module dans la plupart des cours d'eau français. Ce chiffre mérite dans certains cas d'être affiné.

En effet, il apparaît que selon le type géomorphologique du cours d'eau, l'effet d'une réduction de débit sur la surface pondérée utile vis-à-vis d'un stade donné d'une espèce de poisson peut être plus ou moins marqué.

Ainsi, les courbes reliant le débit à la surface pondérée utile correspondant à divers stades de vie de la truite fario ont des allures différentes selon qu'il s'agit :

- d'une part, d'un tronçon court-circuité d'un cours d'eau situé dans une gorge calcaire encaissée, et constitué d'une alternance de mouilles profondes et de seuils stabilisés par des blocs de tuffs ou des conglomérats de pierres grossières ;
- d'autre part, d'un tronçon court-circuité d'un cours d'eau s'écoulant dans une vallée glaciaire, et dont le lit moyen constitué d'alluvions grossières est très étalé et facilement modelable.

Dans le premier cas, si l'on s'intéresse au stade adulte de la truite fario, la réduction du débit est beaucoup moins pénalisante pour une même proportion du module (9 m³/s) que dans le deuxième cas, pour lequel le module est d'environ 5 m³/s (figure 5).

Une telle analyse, jointe éventuellement à une description cartographique détaillée (figure 6) permet d'argumenter plus finement le choix d'un débit réservé qu'une méthode générale comme celle proposée par TENNANT (1976).

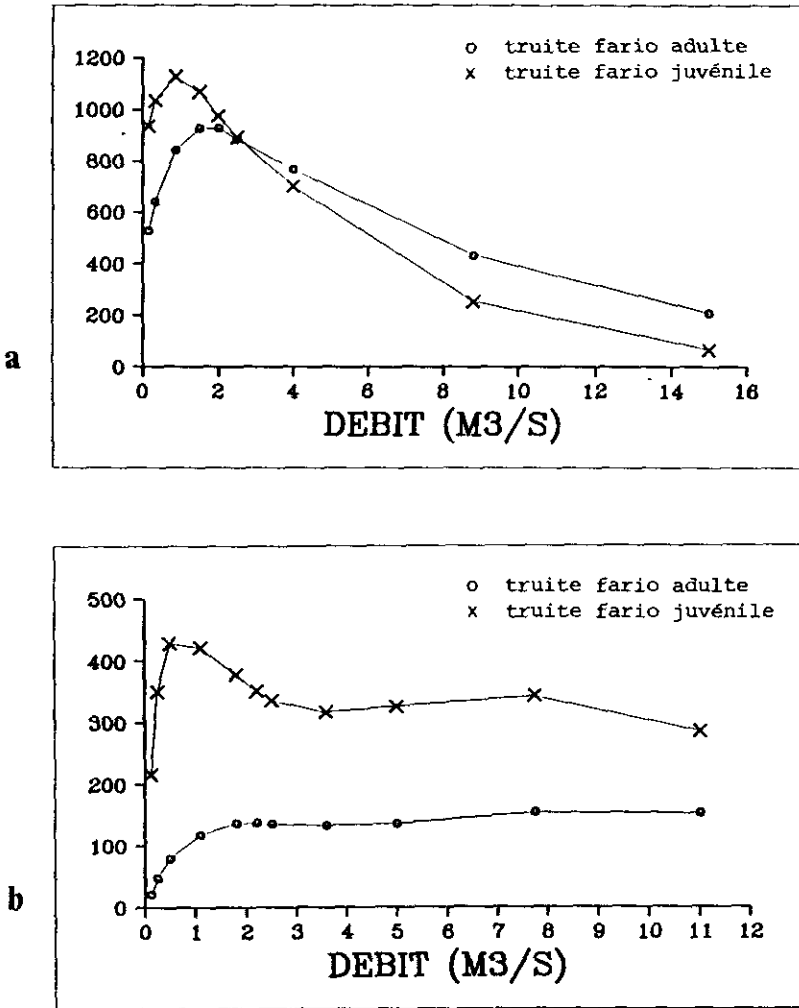


Figure 5. - Evolution de la surface pondérée utile de deux stations en fonction du débit.

5a : cours d'eau encaissé dans une gorge calcaire.

5b : cours d'eau remaniant des alluvions fluvio-glaciaires.

ordonnée : surface pondérée utile (m²).

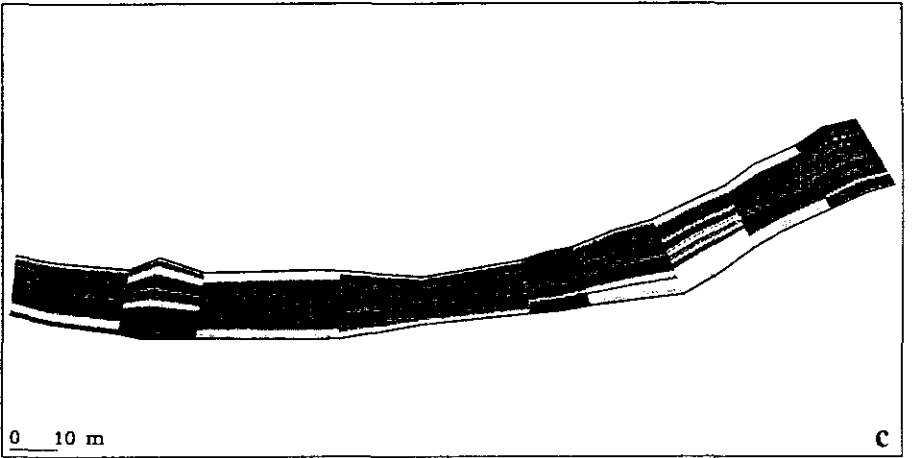
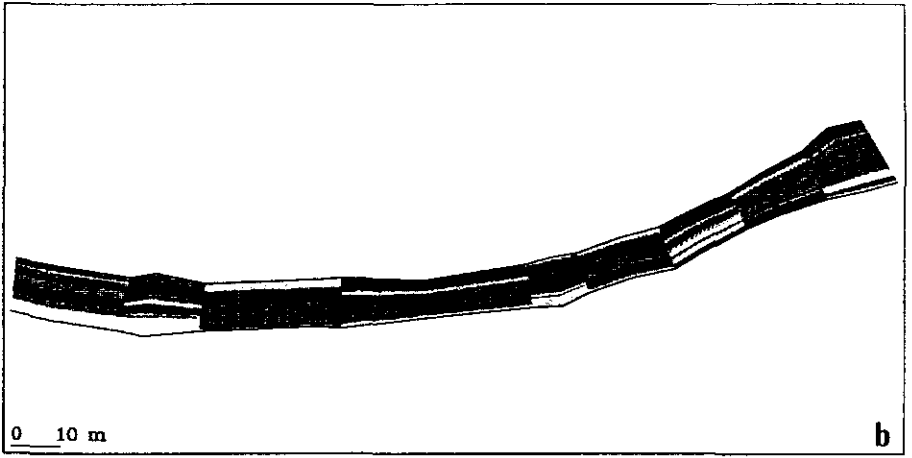
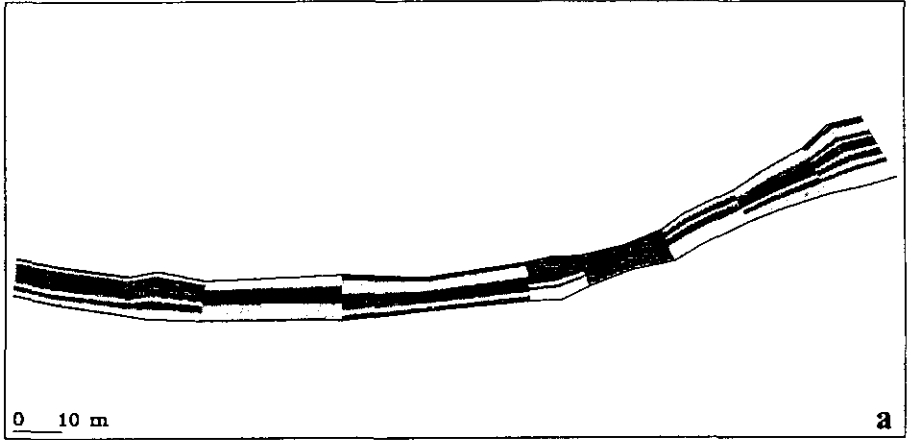
Figure 5. - Relationship between weighted usable area of 2 stream reaches and streamflow.

5a : deeply embanked chalk stream.

5b : stream moving fluvio-glacial deposits.

X.axis : streamflow (m³/s)

Y.axis : weighted usable area (m²)








VALEUR D'HABITAT (%)		HABITAT SUITABILITY (%)	
	DE 50.0 A 100.0	FROM 50.0 TO 100.0	
	DE 10.0 A 50.0	FROM 10.0 TO 50.0	
	DE 1.0 A 10.0	FROM 1.0 TO 10.0	
	DE 0.0 A 1.0	FROM 0.0 TO 1.0	
	HORS D'EAU	OUT OF WATER	

Figure 6. - Cartographie de la valeur d'habitat pour la truite fario adulte des cellules de description de la station correspondant à la figure 5b pour trois débits.

6a : débit de 125 l/s
 6b : débit de 500 l/s
 6c : débit de 1,8 m³/s

Figure 6. - Cartography of adult brown trout habitat suitability of cells used for describing the stream reach corresponding to figure 5b.

6a : streamflow of 125 l/s
 6b : streamflow of 500 l/s
 6c : streamflow of 1,8 m³/s

3-2 Gestion piscicole

L'utilisation de la méthode des microhabitats présente *a priori* un grand intérêt pour la conception d'un plan de gestion piscicole d'un cours d'eau (SOUCHON et TROCHERIE, à paraître a).

Un diagnostic précis de la capacité d'accueil du milieu constitue en effet un élément indispensable au choix des actions halieutiques, en complément de la connaissance de la dynamique du peuplement de poissons exploités et de l'estimation du rendement de la pêche.

Un travail méthodologique a été entrepris dans ce domaine sur l'Yzeron, cours d'eau périurbain situé dans le département du Rhône. Ses caractéristiques ainsi que le détail des données recueillies relatives au peuplement de poissons et à la pratique halieutique sont décrits par LACOMBE (1988).

Quatre stations d'une longueur de 60 à 120 mètres représentatives des différents tronçons du cours d'eau ont été choisies pour appliquer le modèle de microhabitats sur la truite fario, espèce principale de la zone amont.

Les valeurs d'habitat ont été calculées pour les différents débits moyens mensuels pour chaque stade : frai, alevin, juvénile, adulte (figure 7). Si l'on excepte le frai qui doit être analysé à une autre échelle spatiale et pour lequel de réelles potentialités semblent exister, le stade le plus critique est celui des adultes, particulièrement de juillet à septembre.

Sur l'Yzeron, où la croissance des truites correspond à la moyenne des rivières françaises définie par CARLANDER (1969) (longueur totale de 160 mm à 2 ans, de 206 mm à 3 ans), les classes d'âges 2+, 3+ et 4+ constituent le groupe des adultes.

Aucune truite de ce cours d'eau n'atteint 5 ans.

Trois hypothèses ont été émises :

1. Chaque mètre carré de surface pondérée utile peut être assorti d'une biomasse potentiellement supportée par le cours d'eau.

Pour les adultes, la valeur proposée par BOVEE de 65 grammes par mètre carré de surface pondérée utile a été retenue ici.

2. La mortalité est considérée comme exponentielle,

$$\text{soit } N_t = N_{t_0} \times e^{-Z(t-t_0)}$$

où N_t est le nombre de poissons vivant à l'instant t
 N_{t_0} est le nombre de poissons vivant à l'instant t_0
 Z est le taux instantané de mortalité

Le taux de mortalité a été calé par classe d'âge à partir d'observations réalisées dans une zone en réserve de pêche.

3. La croissance pondérale suit une loi de Von BERTALLANFY dont les coefficients peuvent être estimés par régression non linéaire.

$$W_t = W_{\infty} \times (1 - e^{-k(t-t_0)})^b$$

où W_t est la masse en grammes du poisson à l'âge t

En considérant le développement de chaque cycle annuel de la truite depuis le mois de mars d'une année n à février de l'année $n+1$, il est possible d'estimer pour chaque mois i ($i = 0$ pour mars à $i = 11$ pour février) la quantité maximale N_i^{2+} de truites fario d'âge 2+ que pourrait supporter en mars une station si le mois i était critique, en terme de capacité d'accueil, pour le développement des adultes.

Cette estimation se fait à l'aide de la formule suivante :

$$N_i^{2+} \times (W_i^{2+} \times e^{-ixZ^{2+}} + W_i^{3+} \times e^{-(12-i)xZ^{2+} - ixZ^{3+}} + W_i^{4+} \times e^{-(12-i)xZ^{2+} - (12-i) \times Z^{3+} - i \times Z^{4+}}) = \text{SPU}_i \times 65$$

où W_i^{2+} est la masse en grammes des truites d'âges 2+ au mois i
 Z^{2+} est le taux instantané de mortalité de la classe 2+, en mois⁻¹
 SPU_i est la surface pondérée utile de la station en mètres carrés, au mois i

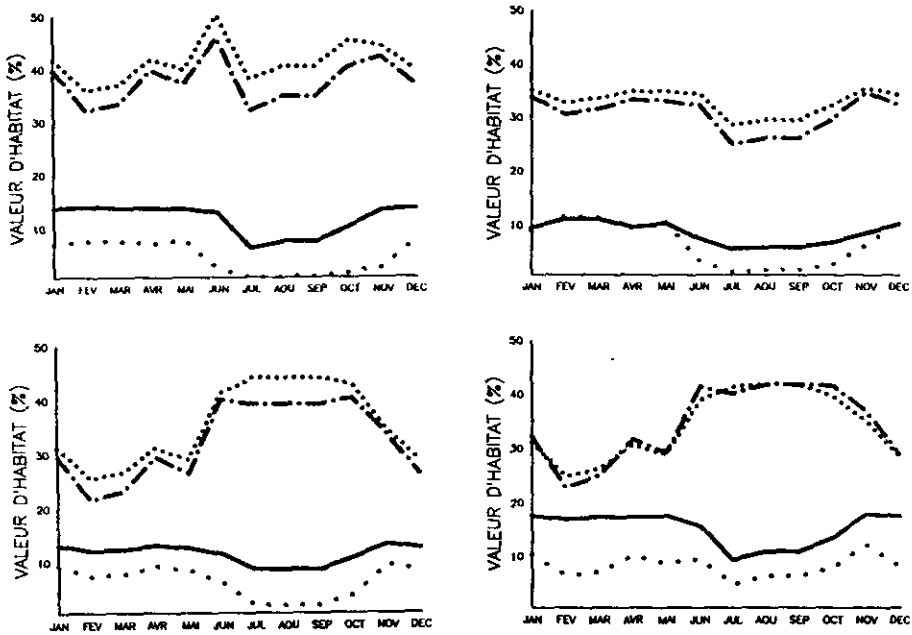


Figure 7. - Evolution mensuelle des valeurs d'habitat de 4 stations de l'Yzeron.

Figure 7. - Monthly evolution of habitat suitability of 4 reaches on Yzeron stream.

Y. axis : habitat suitability (%)

Légende	Stade de la truite fario	brown trout lifestage
—	adulte	adult
.....	juvénile	juvenile
- - - -	alevin	fry
· · · · ·	reproduction	spawning

65 g/m² est la capacité d'accueil maximale par mètre carré proposée par BOVEE (1982).

La valeur minimale des N_i^{2+} donne la capacité potentielle du cours d'eau à abriter des truites adultes, en situation naturelle moyenne.

Il est alors possible, en évaluant les captures effectuées par les pêcheurs et en calculant mois par mois les capacités d'accueil résiduelles, d'optimiser d'éventuels repeuplements en cours de saison de pêche.

Plusieurs scénarios ont ainsi été établis sur l'Yzeron et proposés aux sociétés de pêche (LACOMBE, 1988).

Un autre intérêt de ce type de démarche réside dans la comparaison globale entre les quantités de truites que peut accueillir l'ensemble d'un cours d'eau en l'absence de toute perturbation chimique et les captures des pêcheurs adhérents à la société gestionnaire des droits de pêche. Dans le cas de l'Yzeron, il est apparu que le cours d'eau satisferait naturellement à la demande sans aucune action de repeuplement, si toute une partie du linéaire (60 % du potentiel d'accueil) n'était dégradée chimiquement.

La concentration des pêcheurs sur un parcours de plus petite dimension oblige la société de pêche à effectuer de nombreux déversements, dont le coût est actuellement supporté par les pêcheurs et non par les entreprises et collectivités responsables de la dégradation du milieu.

3-3 Perspectives

D'ores et déjà, la méthode des microhabitats telle que définie par BOVEE (1982) présente un grand intérêt pour établir de façon objective des règles de gestion des cours d'eau en tenant compte de leurs potentialités piscicoles, l'exercice paraissant d'autant plus valide que des modifications mineures concernant le modèle hydraulique et les courbes de préférence sont effectuées.

Une amélioration plus décisive de cette méthode semble pouvoir être apportée par l'utilisation de techniques d'analyse multidimensionnelle.

Il apparaît toutefois nécessaire de replacer cette méthode dans une compréhension plus large des systèmes aquatiques, tenant compte de la valeur nutritionnelle des cours d'eau, de la stabilité dans le temps du lit et du substrat, des effets néfastes de températures élevées ou de la dégradation chimique de l'eau.

Par ailleurs, une utilisation plus large de cette méthode devrait permettre de façon concrète d'ajuster au mieux les paramètres nécessaires à son application en terme de gestion piscicole des cours d'eau à truites.

Ainsi, il serait intéressant de mettre en place des "observatoires" régionaux de gestion, constitués :

- d'une part de zones de cours d'eau exemptes de toute pollution et mises en réserve de pêche, dans lesquelles pourraient être mieux calées les relations entre surfaces pondérées utiles et biomasses de truites, et où les conditions de développement des truites pourraient être observées et modélisées en dehors de toute capture ;
- d'autre part, des zones de cours d'eau exploitées par la pêche, dans lesquelles seraient analysés avec précision l'effort de pêche et les effets de l'activité halieutique sur la population de truites, en se référant au potentiel du cours d'eau établi d'après les observations effectuées dans les zones de réserve.

La méthode des microhabitats pourrait ainsi fournir un cadre conceptuel performant pour guider le travail des équipes techniques oeuvrant dans le domaine de la biologie des pêches afin de conseiller au mieux les gestionnaires de la pêche dans leurs actions.

Le programme d'études du Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative correspondant à cet exposé est financé par le Ministère de l'Environnement et la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

Ce laboratoire travaille en collaboration avec le Laboratoire de Géographie de l'Université Lyon III.

L'analyse multidimensionnelle a été effectuée en utilisant les logiciels développés par l'Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse des Données (22, rue Charcot - 75013 Paris).

Les illustrations ont été réalisées en utilisant les logiciels de la bibliothèque graphique UNIRAS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BACHMAN R.A. (1984). Foraging behaviour of free-ranging wild and hatchery brown trout in a stream. *Trans Am. Fish. Soc.*, 113 (1) : 1-32.
- BATHURST J.C. (1982). Flow Resistance in boulder bed streams. In : HEY R.D., BATHURST J.C., THORNE C.R. (Eds.), *Gravel Bed Rivers*. John Wiley and Sons Ltd, 443-465.
- BATHURST J.C. (1986). Slope area discharge gaging in mountain rivers. *J. Hydraul. Eng.*, 112 (5) : 376-381.
- BAUME J.P., POIRSON M. (1984). Notices d'utilisation des logiciels TALWEG-FLUVIA. Notes internes CEMAGREF, Division Hydrologie Hydraulique Fluviale, 20 p.
- BOVEE K.D. (1982). A guide to stream habitat analysis using to Instream Flow Incremental Methodology : Instream Flow Information Paper n° 12. FWS/OBS 82/26. Western Energy and Land Use Team, U.S. Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado, 248 p.
- BOVEE K.D., MILHOUS R.T. (1978). Hydraulic simulation in instream flow studies : Theory and techniques. Instream Flow Information Paper n° 5. FWS/OBS 78/33. U.S. Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado, 125 p..
- CARLANDER K.D. (1969). *Handbook of freshwater fishery biology*, vol. I. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 752 p.
- CAZES P. (1980). L'analyse de certains tableaux rectangulaires décomposés en blocs : généralisation de propriétés rencontrées dans l'étude des correspondances multiples. I. Définitions et application à l'analyse canonique des variables qualitatives. *C.A.D.*, vol. V, n° 2 : 145-161.
- CUNJAK R.A., POWER G. (1986). Winter habitat utilization by stream resident brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*) *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 43 : 1970-1981.

- FRAGNOUD E. (1987). *Préférences d'habitat de la truite fario (Salmo trutta fario L., 1758) en rivières (quelques cours d'eau du Sud-Est de la France)*. Thèse Université Claude Bernard Lyon 1. CEMAGREF, 398 p.
- HERRICKS E.E., BRAGA M.I. (1987). Habitat elements in river basin management and planning. *Wat. Sci. Techn.*, Vol. 19, n° 9, 19-29.
- HEY H.D. (1982). Design equations for mobile gravel-bed rivers. In : HEY R.D., BATHURST J.C., THORNE C.R. (Eds.), *Gravel - Bed Rivers*. John Wiley and Sons Ltd, 553-580.
- JARRETT R.D. (1984). Hydraulics of high-gradient streams. *J. Hydraulic Eng.*, 110 (11) : 1519-1539.
- LACOMBE C. (1988). Définition d'un plan de gestion piscicole. Application au cas de l'yzeron (Rhône). Mémoire de fin d'études de l'ENITF CEMAGREF DQEPF, LHQ 52 p. + annexes.
- LEGER L. (1909). Principes de la méthode rationnelle du peuplement des cours d'eau à Salmonidés. *Trav. Lab. Piscicult. Grenoble*, 1 : 533-568.
- LEGER L. (1945). Economie biologique et productivité de nos rivières à cyprinidés. *Bull. Fr. Piscicult.*, 139 : 49-69.
- LOAR J.M. (1985). Application of Habitat Evaluation Models in Southern Appalachian Trout Streams. Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division Publication Number 2383, ORNL/TM. 9323, Oak Ridge, Tenn, 310 p.
- MALAVOI J.R. (1986). Le substrat des rivières à fond graveleux. Approche descriptive. Rapport de D.E.A. Université Lyon III CEMAGREF, 80 p.
- MATHUR D. (1986). Reply to "In Defense of the Instream Flow Incremental Methodology" by D.J. Orth and O.E. Maughan. *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 43 : 1093-1094.
- MATHUR D., BASON W.H., PURDY E.J., SILVER C.A. (1985). A critique of the Instream Flow Incremental Methodology. *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 42 : 825-831.
- NELVA A. (1985). Biogéographie, démographie et écologie de *Chondrostoma nasus nasus* (L., 1758) (Hotu, Poisson, Téléostéen, Cyprinidé). Thèse Université Claude Bernard Lyon I, 360 p.
- NELVA A., PERSAT H., CHESSEL D. (1979). Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichtyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage ponctuel d'abondance. *C.R. Acad. Sc.*, t. 289, série D : 1295-1298.
- ORTH D.J. (1987). Ecological considerations in the development and application of instream flow-habitat models. In : *Regulated Rivers : Research and Management*, John Wiley and Sons, vol. 1 : 171-181.
- ORTH D.J., MAUGHAN O.E. (1982). Evaluation of the Incremental Methodology for recommending instream flows for fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 111 : 413-445.
- ORTH D.J., MAUGHAN O.E. (1986). In Defense of the Instream Flow Incremental Methodology. *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 43 : 1092-1093.
- PIALOT D. (1985). *Analyse des données de milieu en hydrobiologie. Apport des techniques d'analyse multivariées*. Thèse 3ème cycle, Université Cl. Bernard Lyon I, 338 p.
- PIALOT D., CHESSEL D., AUDA Y. (1984). Description de milieu et analyse factorielle des correspondances multiples. *C.R. Acad. Paris*, t. 298, série III n° 11 : 309-314.
- SABATON C. (1987). Quinze experts au fil de l'eau. Rapport EDF, 42 p.
- SCOTT D., SHIRVELL C.S. (1987). A critique of the Instream Flow Incremental Methodology and observations on flow determination in New Zealand. In : KEMPER J.B. and GRAIG J. (Eds.), *Regulated Streams. Advances in Ecology*. Plenum Press, New-York, 27-43.
- SOUCHON Y., TROCHERIE F., à paraître a). Aspects techniques de la loi française relative à la pêche en eau douce (juin 1984) : Les "schémas de vocation piscicole" et les "plans de gestion". *Symposium CECPI-EIFAC 1988 sur les schémas d'aménagement des pêcheries continentales Göteborg 31 mai-3 juin 1988*.
- SOUCHON Y., TROCHERIE F., WASSON J.G. (1987). Etude hydroécologique de la Seine à l'amont de Troyes (département Aube). Approche méthodologique de l'influence des modifications de débit liées au barrage réservoir. Rapport CEMAGREF DQEPF, LHQ, 163 p.
- TENNANT D.L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1 (4) : 6-10.
- WILZBACH M.A. (1985). Relative roles of food abundance and cover in determining the habitat distribution of stream-dwelling cutthroat trout [*Salmo clarki*]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42 : 1668-1672.