

QUELLES APPROCHES POUR SYNTHÉTISER LE FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DES ÉCOSYSTÈMES D'EAUX COURANTES ?

E. HEROUIN, P. BREIL, M.B. ALBERT

Division Hydrologie-Hydraulique, CEMAGREF, 3 bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 09, France.

RÉSUMÉ

Les approches déterministes existantes décrivant le fonctionnement physique des écosystèmes d'eaux courantes sont *a priori* adaptées à l'échelle locale. Il nous paraît important de développer une démarche visant à synthétiser ce fonctionnement à l'échelle globale du tronçon de rivière, homogène du point de vue géologique et hydrologique. Pour cela, l'utilisation imbriquée d'outils déterministes et d'outils statistiques est nécessaire. Cette démarche suppose de pouvoir définir, pour chaque question biologique, les échelles spatiales et temporelles pertinentes, à l'intérieur desquelles les variables physiques peuvent être décrites par des grandeurs statistiques.

Au regard des outils existants dans les différentes disciplines physiques, de ceux qui peuvent être adaptés à cette préoccupation et de ceux qu'il est nécessaire de développer, nous présentons différents axes de recherches possibles, associant hydrologues, géomorphologues, hydrauliciens et hydrobiologistes.

WHICH APPROACHES CAN SYNTHESIZE THE PHYSICAL FUNCTIONING OF RIVER ECOSYSTEMS ?

ABSTRACT

Existing deterministic approaches describing the physical functioning of river ecosystems are *a priori* adapted to the local scale. It seemed important to develop a synthetic approach of this functioning at the global scale of a reach homogeneous in hydrology and geology. For this approach, coupled deterministic and statistical approaches are necessary. This implies to be able to define, for each biological question, the relevant spatial and temporal scales under which the physical variables can be described statistically.

In the context of the tools available in the different physical disciplines, of those that can be adapted to this concern, and those which have to be developed, we present different potential research orientations that associate hydrologists, hydrogeomorphologists and hydrobiologists.

1. INTRODUCTION

La quantification des potentialités d'habitat dans un cours d'eau passe par la détermination de la répartition des conditions d'écoulement (tirants d'eau, vitesses, contraintes au fond,...) dans l'espace et dans le temps, ainsi que de la nature du substrat (granulométrie, colmatage éventuel,...) à l'intérieur du lit mineur, et les conditions de mise en eau des annexes hydrauliques et du lit majeur.

Les géomorphologues fluviaux étudient les caractéristiques du lit dans l'espace et dans le temps en relation avec les caractéristiques hydrologiques et géologiques du bassin versant et de la vallée, et l'occupation du sol. En ce qui concerne les caractéristiques de l'écoulement, les débits sont étudiés par les hydrologues, les tirants d'eau, vitesses et

contraintes au fond, par les hydrauliciens. Dans un tronçon, la variabilité temporelle des conditions d'écoulement est liée à la variation des débits dans le temps, leur variabilité spatiale aux caractéristiques du lit (géométrie et substrat).

L'interaction entre l'écoulement liquide et le fond solide se traduit à deux échelles de temps. L'action de l'écoulement sur les caractéristiques du fond (géomorphologie fluviale) se fait au rythme des crues, donc sur des durées assez longues. L'action des caractéristiques du fond sur l'écoulement (hydraulique) est la plus sensible à faible débit, et est immédiate. Ceci permet de traiter les deux problèmes indépendamment, à condition que les variables utilisées pour la description du lit soient définies en commun.

Dans un objectif de gestion à l'échelle du bassin versant, nous devons travailler sur l'entité géographique la plus grande possible, qui ait une certaine homogénéité au niveau de son fonctionnement physique.

L'entité pertinente nous semble être le tronçon, que nous définissons comme un linéaire de cours d'eau homogène d'un point de vue hydrologique et géologique. Ceci implique qu'il n'y ait pas de confluent importants dans le tronçon, et que les effets de laminage des crues soient négligeables, que la pente et la géologie de la vallée soient constants.

Il ne nous paraît pas réaliste de vouloir déterminer en tout point de l'espace et à tout instant, les caractéristiques de l'écoulement et du lit. Pour cela il faut définir avec les hydrobiologistes des variables synthétiques pertinentes associées à des échelles spatiales ou temporelles, pour lesquelles les paramètres de l'écoulement et du lit seront caractérisés de manière statistique.

La plupart des modèles développés jusqu'à présent s'intéressaient aux impacts de l'écoulement et de la dynamique du lit sur l'habitat humain (inondations, érosions,...).

En ce qui concerne la mise en eau des annexes hydrauliques et du lit majeur, les modèles hydrologiques et hydrauliques classiques sont *a priori* facilement adaptables, car la connaissance du débit et de la hauteur d'eau est *a priori* suffisante.

Par contre, ils ne sont pas nécessairement utilisables tels quels pour les problèmes liés aux habitats aquatiques dans le lit mineur, car l'entité géographique fonctionnelle, les variables pertinentes, les échelles de temps et d'espace sont souvent différentes : le poisson vit dans l'eau et l'homme au bord de l'eau !

Chacune des quatre disciplines est donc amenée à adapter des concepts ou outils existants ou à développer de nouveaux concepts ou outils.

2. VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE LA MORPHOLOGIE

2.1. Processus de dynamique fluviale

L'analyse des multiples observations *in situ* et l'étude des mécanismes de transport solide permettent d'appréhender les processus d'évolution des rivières alluviales (LEOPOLD *et al.*, 1964 ; RHODES et WILLIAMS, 1979 ; RICHARDS, 1982).

La morphologie du lit mineur (profil en long, profils en travers, tracé en plan, granulométrie) tend à s'ajuster, à travers les mécanismes d'érosion/dépôt, de manière à ce que sa capacité d'écoulement des débits liquides et solides corresponde aux apports fournis par le bassin versant.

Si l'on considère l'évolution d'un tronçon homogène de rivière sur une longue période au cours de laquelle il n'a pas eu à subir de rupture dans le régime de ses apports (d'origine climatique ou anthropique) et a pu évoluer librement sur ses alluvions, ces processus d'ajustement font apparaître :

— des caractères morphologiques qui se modifient sous l'effet des crues : migration des méandres et des seuils et mouilles vers l'aval, brusque changement de lit...

— des caractères qui se conservent à travers ces modifications : pente longitudinale moyenne, gabarit moyen, longueur d'onde des méandres et des séquences seuil/mouille, étendue granulométrique du substrat... ; ces caractères sont représentatifs de l'équilibre morphologique vers lequel tend le cours d'eau, malgré ou plus exactement à travers les mouvements de la dynamique fluviale ; cet équilibre dynamique du lit conditionne l'équilibre écologique, lui aussi dynamique.

Des corrélations ont été établies entre ces paramètres caractéristiques moyens de la morphologie du lit à l'équilibre : par exemple, LÉOPOLD *et al.* (1964) ont montré que la longueur d'une séquence seuil/mouille était en moyenne comprise entre 5 et 7 fois la largeur du lit à plein bord et cette valeur moyenne n'a pas été remise en cause depuis (GREGORY *et al.*, 1994) ; de même, la longueur d'onde des méandres, leur rayon de courbure, apparaissent corrélés à cette largeur... Pour les rivières à lits rectilignes et à méandres, la pente a pu être reliée au débit de plein bord et à la granulométrie moyenne (HENDERSON, 1961).

La recherche de corrélations entre ces paramètres et le régime hydrologique a donné naissance au concept de «débit dominant» (appelé aussi débit «efficace» ou «morphogène») considéré comme équivalent — du point de vue des caractéristiques moyennes de la morphologie du lit à l'équilibre — à la succession des débits naturels. Ce débit dominant a été identifié en valeur au débit de plein bord et en fréquence à la crue annuelle, sachant que cette fréquence est une valeur moyenne qui recouvre une grande dispersion non encore clairement expliquée.

Des travaux récents (PETIT *et al.*, 1994) tentent de relier cette fréquence aux caractéristiques du substrat et de la charge solide.

L'introduction du concept de «débit dominant» permet :

- de replacer le tronçon dans le contexte hydrologique de son bassin versant et de caractériser la fréquence de débordement mineur-majeur,
- d'intégrer l'effet cumulé des variations de débits sur les paramètres représentatifs de l'équilibre morphologique du lit et donc de pouvoir considérer ces paramètres comme des constantes à l'échelle de temps humaine (*a fortiori* à celle du poisson)... du moins tant que cet équilibre n'est pas rompu, c'est-à-dire tant que la rivière ne subit pas de bouleversements dans le régime de ses débits liquides ou solides (barrages, extractions, transformation de l'occupation du sol sur le bassin versant...) ou bien dans le fonctionnement de ses lits (recalibrage, endiguement...).

2.2. Représentation de la morphologie

Sur ces bases, il paraît possible de fonder une représentation de la morphologie du lit mineur d'une rivière qui permette de synthétiser son fonctionnement physique d'une manière qui soit pertinente à la fois vis-à-vis des processus de la dynamique fluviale et vis-à-vis de l'habitat aquatique.

Dans la représentation que nous proposons, chaque tronçon homogène est décrit par les paramètres moyens de pente, de gabarit, de rugosité, auxquels on associe l'information sur la répartition statistique des faciès et de la granulométrie à l'intérieur du tronçon. Ce faisant, on suppose que la connaissance de l'emplacement exact des différents faciès et profils en travers — qui de toute façon évolue au cours du temps — n'est pas nécessaire du moment qu'on est sûr de leur présence dans le tronçon. Sous réserve que cette option soit compatible avec le degré d'information attendu par les hydrobiologistes, elle permettrait d'alléger considérablement la modélisation hydraulique.

La description des paramètres moyens suffit pour estimer le débit de plein bord, à l'aide de modèles hydrauliques (calcul de ligne d'eau en régime permanent, voire uniforme), et raisonner sur l'impact d'éventuels aménagements sur l'équilibre du lit.

Cette même description des paramètres moyens et la connaissance de la répartition statistique des différents faciès, servent de base à la reconstitution de la distribution des variables physiques locales (voir partie 3 : «variabilité spatiale des conditions d'écoulement»).

2.3. Perspectives

Beaucoup de travail reste à faire, en collaboration avec les géomorphologues, pour valider cette approche et la rendre opérationnelle, dans une optique de gestion équilibrée des cours d'eau :

- mieux cerner le concept de «débit dominant» dans le cas des tronçons naturels en équilibre et le régionaliser pour qu'il puisse servir de référence ; l'utilisation des modèles hydrologiques «QdF» (débit-durée-fréquence) — qu'il sera peut-être nécessaire d'étendre à des crues de période de retour inférieure à 6 mois — permettent d'associer à une valeur de débit non seulement une fréquence d'occurrence, mais également la durée pendant laquelle le débit est continûment dépassé (caractéristique importante pour le transport solide).
- voir si, dans le cas des tronçons soumis à l'influence d'aménagements, ce concept de débit dominant peut apporter davantage qu'une référence à un fonctionnement naturel.
- mettre au point des protocoles de recueil de données (sur cartes et sur le terrain) pour accéder aux paramètres morphologiques qui nous intéressent, sans avoir à tout mesurer ; ce volet peut s'appuyer sur des travaux déjà réalisés dans une optique de liaison géomorphologie / hydroécologie (MALAVOI, 1991 ; ANDRIAMAHEFA, 1993).

3. VARIABILITÉ SPATIALE DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT

La détermination des conditions d'habitat physique dans un cours d'eau suppose d'être en mesure, non seulement de calculer une ligne d'eau, mais également de déterminer la répartition des variables physiques (hauteur, vitesse, contrainte) dans le tronçon.

Nous allons distinguer deux types d'écoulement, car les outils hydrauliques utilisables ne sont pas les mêmes dans ces deux cas : les écoulements à forts tirants d'eau, d'une part, et les écoulements à faibles tirants d'eau, d'autre part. La hauteur d'eau limite entre ces deux types d'écoulement se situe autour de 4 à 5 fois la granulométrie grossière.

3.1. Ecoulements à forts tirants d'eau

En ce qui concerne les écoulements à forts tirants d'eau, les modèles hydrauliques classiques permettent de calculer la ligne d'eau dans le lit mineur, cette dernière donnant accès au tirant d'eau dans les annexes hydrauliques, ainsi que dans le lit majeur en crue.

La répartition des tirants d'eau s'obtient par différence entre la répartition des côtes du fond (morphologie du lit) et la ligne d'eau calculée (côtes de la surface libre).

Plusieurs modèles de calcul de la répartition des vitesses et contraintes au fond ont été développés : des modèles tridimensionnels (3D) résolvant les équations de Navier-Stokes avec l'hypothèse de pression hydrostatique (WANG, 1988), des modèles 2D résolvant les équations de Saint-Venant (LECLERC *et al.*, 1994), des modèles 1D avec distribution des vitesses longitudinales selon la direction transversale, en fonction de la rugosité et du tirant d'eau (BOVEE, 1982 ; SOUCHON *et al.*, 1989), des modèles statistiques (voir paragraphe suivant). Les résultats du 1D s'éloignent de la réalité quand la section en travers varie rapidement en fonction de l'abscisse longitudinale, alors que le modèle 2D permet de prendre en compte cette information spatiale.

3.2. Ecoulements à faibles tirants d'eau

En ce qui concerne les écoulements à faibles tirants d'eau, la plupart des recherches ont porté sur la détermination des pertes de charges (BATHURST, 1985 ; MILLER et WENZEL, 1985 ; THORNE et ZEVENBERGEN, 1985) pour calculer des lignes d'eau ; quelques travaux ont porté sur les profils verticaux des vitesses (WIBERG et SMITH, 1991).

Certains types d'écoulement, comme les écoulements en marches d'escalier, ont peu fait l'objet de recherches particulières. Des travaux récents ont déterminé une loi de débit sur seuil naturel (DUPASQUIER, 1994). Des modèles stochastiques de calcul de ligne d'eau restent à développer pour ce type d'écoulement.

La détermination de la répartition des hauteurs, vitesses et contraintes a également fait l'objet de développements récents. Différentes approches ont été utilisées :

- des approches statistiques, dont l'objectif est de relier des distributions de contraintes ou de vitesses à une échelle donnée (tronçon, faciès,...) à des macro-descripteurs de la morphologie et de l'écoulement (nombre de Froude, rugosité relative, nombre de Reynolds, rapport largeur/hauteur, variabilité de la largeur, alternance seuils-mouilles,...). Ces approches ont été menées sur les contraintes au fond (LAMOUREUX *et al.*, 1992) et sur les vitesses (LAMOUREUX *et al.*, 1995). Ces approches sont également adaptées aux écoulements à forts tirants d'eau.
- des approches déterministes en représentant l'écoulement entre gros blocs, comme un écoulement en milieu poreux, et en résolvant ensuite des équations 3D de type Navier-Stokes en milieu poreux, la porosité valant entre 0 et 1 entre les blocs, et 1 au-dessus (OLSEN et STOKSETH, 1994).
- extension aux faibles tirants d'eau des méthodes de redistribution des vitesses en fonction de la géométrie et de la rugosité (travaux non publiés, E. HEROIN, Cemagref-Lyon et Y. LE COARER, Cemagref-Aix-en-Provence).

Les modèles déterministes requièrent une géométrie réelle ou virtuelle représentative du tronçon, alors que les modèles statistiques requièrent des macro-descripteurs de la géométrie du tronçon.

La pertinence de ces différentes approches dépend de l'échelle d'espace choisie : plus l'élément considéré est de petite dimension, plus les modèles devront être sophistiqués et déterministes, avec la lourdeur de mise en oeuvre que cela implique.

4. VARIABILITÉ TEMPORELLE DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT

Sous sa forme actuelle (SOUCHON, 1994), la simulation physique de l'habitat aquatique considère les conditions hydrauliques locales comme les paramètres mesurant l'affinité du poisson pour son milieu. La «potentialité d'habitat» du linéaire de rivière prospecté est calculée pour différents débits. Selon le stade du poisson, plusieurs courbes d'habitat sont ainsi obtenues. En rivière à débits peu variables (débits réservés), la pertinence de cette potentialité est corroborée par la densité de poisson (POUILLY et SOUCHON, 1995). Pour les rivières naturelles, à débits variables, la notion de potentialité garde une certaine cohérence. Cette robustesse traduit la capacité d'adaptation des organismes biologiques à des conditions hydrodynamiques fluctuantes. Quelles en sont les limites, ou encore, comment peut-on estimer la potentialité d'habitat en conditions de débit variables ?

D'après les études menées par les biologistes, la variabilité temporelle des débits semble être un facteur prépondérant de la structuration des populations aquatiques (HORWITZ, 1978 ; HUGHES, 1987). La variabilité hydrologique serait plus ou moins systématique ou prévisible, imposant des contraintes d'espace et de temps à des saisons précises (POFF et WARD, 1989). Certaines espèces y seraient alors mieux adaptées. L'observation d'un événement hydrologique peu habituel d'une saison serait à même de perturber, temporairement ou durablement, la structure des communautés aquatiques. Nous trouvons donc dans la variabilité hydrologique un facteur de l'équilibre dynamique qui régit les écosystèmes aquatiques.

Puisque débit et espace habitable sont liés, quelle est la signification de cette potentialité d'habitat dans le temps ? Pour répondre, il est nécessaire de disposer d'une chronique de débit non loin de la station prospectée. Le cas échéant, il est possible de reconstituer une chronique d'habitat, mais comment l'interpréter ?

Il faut savoir que pour les débits limitants, faibles et forts, les potentialités d'habitat sont en général temporairement réduites. Il est donc envisageable d'établir des seuils de «bonnes conditions», tels que 80 ou 90 % du maximum d'habitat potentiel calculé. La persistance d'un minimum requis pour les époques sensibles pourrait être un critère de vraisemblance de la potentialité d'habitat. Ce serait là une manière d'estimer l'habitat

réellement utilisable plutôt que l'habitat potentiel. Une intermittence marquée par de courtes chutes de la potentialité, en liaison avec la variabilité du régime hydrologique, serait un facteur de régulation de la dynamique des populations (VALENTIN *et al.*, 1994). Dans ces deux cas, la variabilité hydrologique devient un élément d'interprétation de la potentialité d'habitat.

La faible disponibilité en données de type micro-habitat rend difficile toute approche typologique de la notion de variabilité temporelle de la potentialité d'habitat. Par contre, il existe des chroniques de débit journalier en nombre suffisant pour aborder une typologie de la variabilité hydrologique. La relation débit-habitat peut être définie *a posteriori*. Pour caractériser un régime hydrologique de façon pertinente pour les écosystèmes aquatiques, il faut quantifier la variabilité fréquente, qui structure sans doute la communauté aquatique sur le long terme puisqu'elle est par définition prépondérante dans le temps. Il faut aussi quantifier la variabilité non fréquente qui structure la communauté aquatique sur le court terme en modifiant la structure interne des populations qui la compose sur quelques années, le temps d'en «effacer» les effets. Il s'agit alors de perturbation à effet temporaire. Le cas des événements hydrologiques rares, de période de retour supérieure à quelques dizaines d'années, peuvent bouleverser profondément le milieu physique mais n'interviennent pas dans la structuration à long terme. Néanmoins, l'écosystème d'origine peut être lié à l'éradication d'espèces ou au contraire à la colonisation inter-bassins lors d'événements exceptionnels, qui rétablissent temporairement des communications hydrauliques.

Le domaine des événements peu fréquents, comme les crues, a déjà fait l'objet de recherches et de modélisations en hydrologie. Ces méthodes ont permis de préciser la notion de variabilité hydrologique (BREIL et MALAFOSSE, 1994). D'un point de vue biologique, il convient de distinguer les crues juste débordantes, propices à la reproduction en zone enherbée par exemple, des crues plus rares et hydrauliquement contraignantes pour le milieu aquatique.

La variabilité des débits doit non seulement exprimer les domaines d'accroissement mais aussi les durées de non-satisfaction de la potentialité d'habitat minimale requise. C'est à partir d'une approche statistique de ces descripteurs de la variabilité hydrologique qu'il sera possible d'établir une typologie des rivières et de proposer une réinterprétation des courbes d'habitat.

Pour les conditions de débits peu fréquents, tels que crues et étiages sévères, la potentialité d'habitat sera largement dominée par la morphologie locale du lit de la rivière. Ainsi, la densité d'abris hydrauliques et de mouilles profondes deviendra prépondérante sur la notion de courbe de préférence d'habitat, *a priori* adaptée à des conditions hydrauliques non limitantes. Les densités de populations aquatiques pourraient alors dépendre de la diversité morphologique du lit, qui conditionne l'espace habitable durant les périodes de non-satisfaction de la potentialité minimale d'habitat requise.

L'hydrologie permettra sans doute de caractériser la variabilité hydrologique. Il lui faut cependant disposer des constantes d'espace et de temps appropriées pour rendre un résultat pertinent vis-à-vis de la demande biologique. Ainsi, la gamme des durées de la potentialité minimale d'habitat, requise pour telle activité biologique, doit être cernée en fonction de la diversité morphologique du milieu.

5. CONCLUSION

L'ensemble des approches proposées ci-dessus comporte des simplifications de la réalité physique, donc une perte d'information. L'objectif maintenant va être de déterminer avec les hydrobiologistes des modèles simplifiés permettant néanmoins de prendre en compte les variables physiques pertinentes pour la biologie. En particulier, il convient de définir pour chaque question biologique, les échelles spatiales et temporelles, à l'intérieur desquelles écoulement et substrat peuvent être décrits par des grandeurs statistiques.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIAMAHEFA H., 1993. Eléments pour une typologie morphologique des cours d'eau du bassin de la Loire. Rapport de stage 2^e année ENGREF-Montpellier & CEMAGREF-Lyon, 48 p + annexes.
- BATHURST J.C., 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (4), 625-643.
- BOVEE K.D., 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. *Instream flow information paper*, 12 (FWS/OBS 82/26), U.S. Fish and Wildlife Service, 248 p.
- BREIL P., MALAFOSSE A., 1994. Essai de typologie hydroécologique des écoulements en rivières. *XXIII^e Journées de l'hydraulique, Société Hydrotechnique de France*, 309-314.
- DUPASQUIER B., 1994. Détermination d'une loi de débit sur seuil naturel. Rapport DEA ENGEES-Université Louis Pasteur, Strasbourg, 105 p.
- GREGORY K.J., GURNELL A.M., HILL C.T., TOOTH S., 1994. Stability of the pool-riffle sequence in changing river channels. *Regulated rivers : research & management*, 9, 35-43.
- HENDERSON F.M., 1961. Stability of alluvial channels. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 87, 109-138.
- HORWITZ R.J., 1978. Temporal variability patterns and the distributional patterns of stream fishes. *Ecological Monographs*, 48, 307-321.
- HUGHES J.M.R., 1987. Hydrological characteristics and classification of Tasmanian rivers. *Australian Geographical Studies*, 25, 61-84.
- LAMOUREUX N., STATZNER B., FUCHS U., KOHMANN F., SCHMEDTJE U., 1992. An unconventional approach to modelling spatial and temporal variability of local shear stress in stream segments. *Water Resources Research*, 28, 3251-3258.
- LAMOUREUX N., SOUCHON Y., HEROUIN E., 1995. Predicting velocity frequency distributions in stream reaches. *Water Resources Research* (sous presse).
- LECLERC M., BOUDREAU A., BECHARA J., BELZILE L., VILLENEUVE., 1994. Modélisation de la dynamique des ouananiches (*Salmo salar*) juvéniles de la rivière Ashuamushuan (Québec, Canada). In Cotton F., Asselin S., Shooner G., Bernatchez L. & Bérubé P. (Eds). *Colloque franco-québécois sur l'intégration des technologies modernes à la gestion des poissons dulcicoles et amphihalins*, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Service de la faune aquatique, Québec, 143-154.
- LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., MILLER J.P., 1964. Fluvial processes in Geomorphology. Freeman, San Francisco, 522 p.
- MALAVOI J.R., 1991. Méthodologie de sectorisation et de description des cours d'eau à pente forte et moyenne. Thèse de doctorat en géographie et aménagement. Université Jean Moulin-Lyon III, 517 p.
- MILLER B.A., WENZEL H.G., 1985. Analysis and simulation of low flow hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (12), 1429-1446.
- OLSEN N.R.B., STOKSETH S., 1994. Three-dimensional modelling of hydraulic habitat in rivers with large bed roughness. Proceedings of the first Habitat-Hydraulics Symposium, Norway, 18-20 August 1994, 99-112.
- PETIT F., PAUQUET A., MABILLE G., FRANCHIMONT C., 1994. Variations de la récurrence du débit à pleins bords des rivières en relation avec la lithologie de leur bassin versant et les caractéristiques de leur lit. *Dossiers de la revue de géographie alpine*, 12, 157-161.

- POFF N.L., WARD J.V., 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure : a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Aquatic Sci.* Vol. 46, 1805-1818.
- POUILLY M., SOUCHON Y., 1995. Méthode des microhabitats : validation et perspectives. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 337/338/339.
- RHODES D.D., WILLIAMS G.P., (eds), 1979. Adjustments of the fluvial system. Allen & Unwin, London, 372 p.
- RICHARDS K., 1982. Rivers, forms and process in alluvial channels. Methuen, London.
- SOUCHON Y., 1994. Etat d'avancement des recherches sur la modélisation de l'habitat des poissons en France. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 332, 57-71.
- SOUCHON Y., TROCHERIE F., FRAGNOUD E., LACOMBE C., 1989. Les modèles numériques des micro-habitats des poissons : application et nouveaux développements. *Revue des sciences de l'eau*, 2, 807-830.
- THORNE C.R., ZEVENBERGEN L.W., 1985. Estimating mean velocity in mountain rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (4), 612-624.
- VALENTIN S., LAUTERS F., SABATON C., BREIL P., SOUCHON Y., 1994. Temporal variations of physical habitat for brown trout in hydropeaking situations : methodological approach tested in two French streams. Proceedings of the first Habitat-Hydraulics Symposium, Norway, 18-20 August 1994, 277-293.
- WANG S.S.Y., 1988. Three-dimensional models for fluvial hydraulic simulation. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Budapest, 268-273.
- WIBERG P.L., SMITH J.D., 1991. Velocity distribution and bed roughness in high-gradient streams. *Water Resources Research*, 27 (5), 825-838.