

Des rivières virtuelles pour l'étude de la faune aquatique

Yann Le Coarer et Bernard Dumont

Afin de prévoir les effets des aménagements sur la vie des cours d'eau, il est nécessaire de modéliser le fonctionnement écologique de ces hydro-systèmes. On cherche à mieux connaître les relations, dans l'espace, entre les poissons, les invertébrés et leurs habitats, ainsi que l'évolution de ces relations dans le temps. Dans cet objectif, les données spatiales recueillies sont utilisées dans des modèles informatiques de représentation des rivières. Ces modèles permettront d'associer des informations de nature physique et biologique et de rechercher les meilleures corrélations entre les données.

L'outil présenté ici doit répondre aux besoins de l'écologie pour des eaux courantes. Il permet la reconstitution virtuelle de l'espace aquatique dans un univers informatique où les données acquises peuvent être manipulées à volonté. Différentes échelles de perception spatiale peuvent être utilisées. Elles s'emboîtent, du mètre au kilomètre, et s'étagent de l'habitat du benthos (invertébrés du fond de la rivière) au tronçon de rivière.

Pour cela, nous avons tout d'abord adapté des techniques de topographie électronique à la description morphohydraulique de rivière et à la localisation de données biologiques. Puis nous avons réalisé un travail informatique qui s'apparente beaucoup à la constitution d'un système d'information géographique. Le modèle numérique de terrain (MNT) employé pour décomposer les cours d'eau est constitué d'un maillage en prismes droits à bases triangulaires. Cette démarche MNT permet, entre autres, des calculs hydrauliques de type « éléments finis ». On calcule dans ce cas

les relations entre une unité de l'espace et celles qui l'entourent, de façon itérative. Elle a aussi été appliquée pour la modélisation de l'habitat piscicole par Leclerc *et al.* (1994).

L'originalité de notre travail réside dans la méthode de repérage curviligne : les points sont repérés par rapport à un « mètre ruban » déroulé au milieu de la rivière. Autres originalités, les techniques d'interpolation (génération des points intermédiaires) et la génération de profils en travers (sections transversales) réputés perpendiculaires à l'écoulement. Les possibilités topologiques qui gèrent indifféremment des mailles, des transversales et des polygones permettent de s'extraire de tout *a priori* de structures et de rechercher les corrélations et les statistiques qui représentent le mieux le phénomène observé.

La version actuelle a été développée pour la recherche et fait intervenir une part d'artisanat informatique. Elle nécessitera un effort de reprogrammation et de documentation pour pouvoir être transférable.

Matériel et méthodes de terrain pour modéliser la rivière

La base de la méthode consiste à repérer spatialement les éléments descriptifs de la rivière, qu'ils soient de nature morphohydraulique ou biologique.

Le matériel utilisé comprend :

- un tachéomètre, constitué d'un théodolite électronique Théomat Wild-Leitz T1 000 qui effectue la mesure des angles, et d'un distancemètre Wild

Yann Le Coarer et
Bernard Dumont
Cemagref
Division hydrobiologie
Le Tholonet, BP 31
13612 Aix-en-Provence
cedex 1

DI 1000 à onde porteuse infrarouge, l'ensemble relié à un carnet électronique Wild GRE3 ;

- un prisme réflecteur auto-convergent supporté par une canne ;

- une liaison radio entre les opérateurs décrivant le cours d'eau et la station topographique où est implanté le tachéomètre.

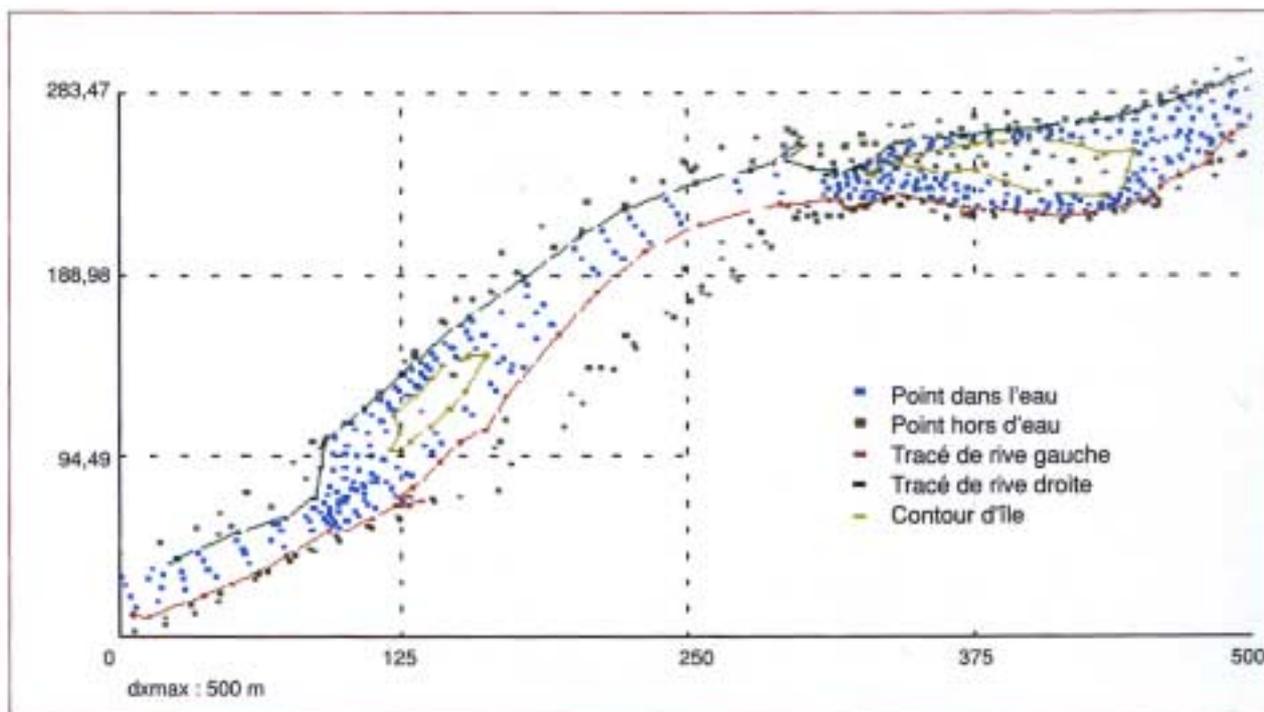
Depuis le tachéomètre, on vise le prisme définissant un point dont la position relative est définie par : une distance oblique, un angle horizontal, un angle vertical, les hauteurs du prisme et de l'appareil par rapport au sol. Le carnet électronique gère en mémoire vive un code d'identification et un numéro de point à incrément automatique. Après déclenchement de la visée, l'enregistrement des coordonnées sphériques du point et des informations de la mémoire vive est automatique. Ces informations, modifiables à volonté, permettent le repérage (eau, contour d'île, etc.) et la description séquentielle indexée des unités topologiques telles que le tracé des rives et les polygones (contour de zone) décrivant les îles, les zones d'isogranulométrie (zones homogènes en variété granulométrique) et d'échantillonnage

(poissons, benthos). En notant le numéro de point on peut référencer dans l'espace toutes les mesures locales, comme la profondeur ou la vitesse de courant. Le carnet électronique permet d'enregistrer manuellement ces mesures.

Pour la topographie de la rivière, nous utilisons une technique de semis densifié ; la densité de points relevés est ainsi fonction de la complexité de la description (figure 1).

Les points rivulaires de bordure de lit mouillé définissent le tracé des rives et la surface de l'eau. Dans les écoulements torrentiels, où la surface de l'eau n'est pas assimilable à un ensemble de plans s'appuyant sur le tracé des rives, il est nécessaire de noter les profondeurs. Ailleurs, elles peuvent être retrouvées par différence d'altitude entre le fond et la surface.

La rapidité de la description varie selon la densité végétale de la ripisylve (forêts le long des cours d'eau) et de la facilité à pénétrer le cours d'eau. Pour des profondeurs supérieures à 1,20 m, l'utilisation d'un bateau et de prismes flottants, associée à des mesures de profondeur, s'avère nécessaire. Cette technique apparaît 2 à 3 fois plus rapide



▲ Figure 1. – Représentation x-y (m) du semis densifié des points topographiques

que les systèmes classiques avec niveau optique et mires.

La description du lit mouillé doit nécessairement être associée à la connaissance du débit. Dans des situations d'écoulement complexe, il est souhaitable de jauger la répartition des débits de part et d'autre des îles, car elle est souvent difficilement calculable par les modèles hydrauliques. Le suivi des variations de niveau d'eau pendant les opérations topographiques peut s'effectuer à l'aide d'une sonde placée au fond de la rivière dont les mesures de pression sont stockées dans une centrale d'acquisition. Pour minimiser les incertitudes liées à ces variations, la surface de l'eau devra être décrite en une phase et le plus rapidement possible.

Le traitement informatique

Les points suivants développent les caractéristiques essentielles des procédures, que nous avons toutes développées et écrites en langage Microsoft Quick Basic 4.5.

• Le repérage curviligne des courbes

Un point topographique situé au fond de la rivière, auquel on affecte une profondeur, décrit en fait une verticale constituée d'un segment de droite remontant jusqu'à la surface.

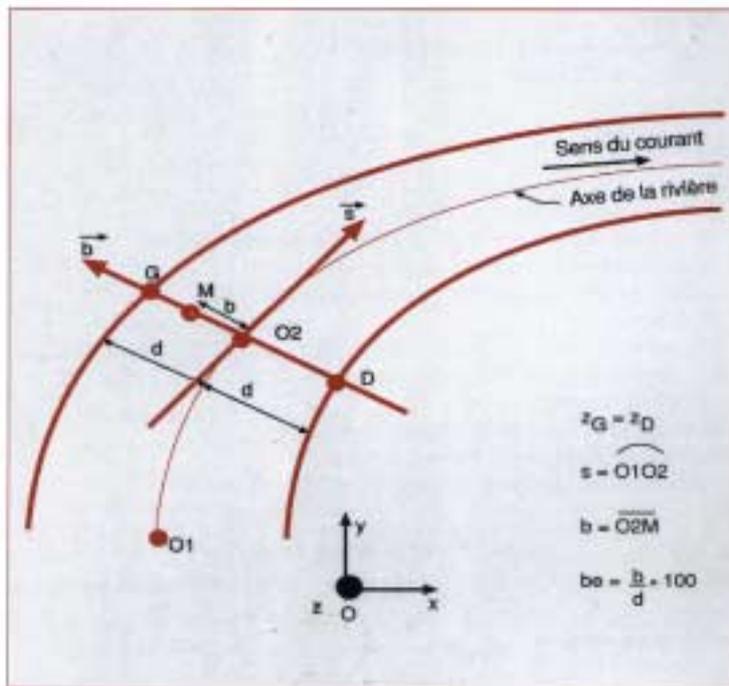
Chaque verticale relevée sur le terrain est repérée dans l'espace, après traitement informatique, par :

- ses coordonnées cartésiennes x, y, z (fond) ;
- sa profondeur ;
- ses coordonnées curvilignes s, b, be (figure 2 et les explications qui suivent).

O1 : origine du système de balayage en abscisse curviligne.

O2 : origine locale du repère curviligne située au milieu du chenal. La détermination de l'axe de la rivière est une phase complexe, elle s'effectue dans le plan horizontal à partir des tracés des rives, tracés qu'il est souvent nécessaire de lisser.

$(O2, \vec{O2s}, \vec{O2b})$: repère normé curviligne tel que $\vec{O2s}$ soit tangent à l'axe de la rivière. La détermination de $\vec{O2b}$ non nécessairement perpendiculaire à $\vec{O2s}$ s'efforce de réaliser l'isoaltitude des deux points rivulaires ayant même abscisse curviligne ($z_G = z_D$). Dans les mouilles où la pente de la surface de l'eau est difficile à estimer



▲ Figure 2. - Principe du repérage curviligne.

→ O2b est fixé par des considérations géométriques à partir du tracé dans le plan horizontal des rives.

Pour le point M on définit :

- son abscisse curviligne s qui est la distance curviligne mesurée le long de l'axe de la rivière :

$$s = \overline{O1O2}$$

- son ordonnée curviligne b comptée positivement depuis l'axe de la rivière vers la rive gauche :

$$b = \overline{O2M}$$

- son pourcentage algébrique d'éloignement à l'axe de la rivière be , un point rivulaire gauche vérifie $be = 100 \%$, un point rivulaire droit $be = -100 \%$:

$$be = \frac{b}{d} * 100$$

où d est la demi-largeur de la rivière au niveau du profil en travers passant par O2.

On dispose ainsi d'un procédé qui permet un classement amont/aval des informations et la définition de plans réputés perpendiculaires à l'écoulement. Ces deux aspects nous paraissent être des passages obligés de la modélisation d'une rivière.

Abscisses curvilignes, maximale, minimale
Pourcentage d'éloignement à l'axe, maximal, minimal
Surface dans le plan (x, y)
Surface du fond
Surface au miroir
Volume d'eau
Hauteurs d'eau, moyenne, maximale, minimale
Vitesse moyenne, maximale, minimale
Contrainte tangentielle exercée au fond, moyenne, maximale, minimale
Pourcentage de surface en dépôt de limon
Hauteurs de dépôt de limon, la plus fréquente, maximale*
Rugosité moyenne*
Rugosité relative moyenne : rapport rugosité moyenne sur hauteur d'eau moyenne
k ₁₆ , k ₅₀ , k ₈₄ , rugosités telles que respectivement 16 %, 50 %, 84 % des rugosités soient inférieures à ces valeurs*
Nombres de Reynolds, moyen, maximal, minimal
Nombres de Froude, moyen, maximal, minimal
* valeurs non produites par le logiciel et issues des données brutes

▲ Tableau 1. – Variables de description locale de la zone de pêche

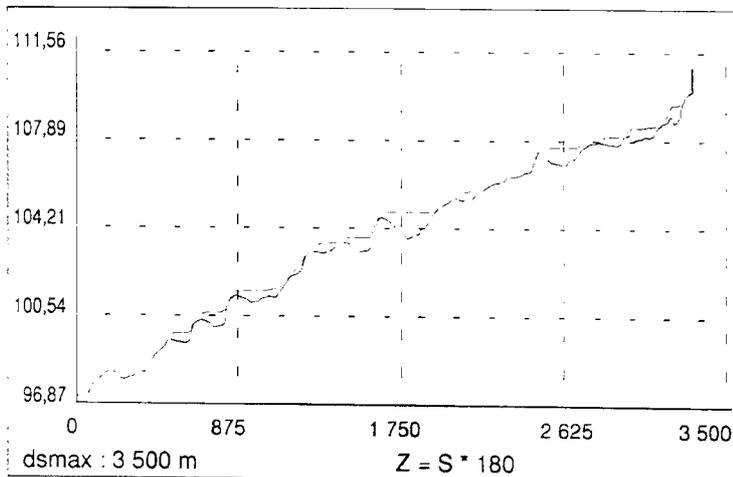
■ Interpolation topographique

A partir des points repérés dans l'espace, on génère des points supplémentaires. La méthode utilisée met en œuvre des règles d'expertise issues de la méthodologie descriptive de terrain.

Dans un premier temps, on détermine leur profondeur. L'un des principes utilisés dans ces calculs consiste à pondérer les profondeurs des points topographiés d'autant plus fortement que leur pourcentage d'éloignement à l'axe be est proche de celui du point interpolé. Ainsi, un point généré en bordure sera peu influencé par la profondeur d'un point situé au milieu du chenal, même si celui-ci est son plus proche voisin.

Les altitudes z (fond) des points interpolés sont ensuite obtenues par différence entre l'altitude de

▼ Figure 3. – Profil en long $s-z$ (m) de la surface et du fond.



la surface de l'eau et la profondeur. Dans les secteurs à écoulements torrentiels, la surface de l'eau est définie à partir de points encadrant le point interpolé, ailleurs par le balayage curviligne iso-altitude s'appuyant sur les points rivulaires.

■ Profils en long et en travers

La procédure d'interpolation permet la génération de profils en travers à la demande ; nous avons mesuré que la précision de leur surface mouillée est d'environ 10 %. Les profils en travers fournissent la profondeur moyenne, la vitesse moyenne et l'altitude de la surface de l'eau le long de l'axe de la rivière. Ceci permet la détermination de la pente de la ligne d'énergie pour toute abscisse curviligne et l'établissement de profils en long (figure 3).

■ Reconstitution des vitesses

Dans les cours d'eau à faible profondeur et à forte rugosité relative, aux écoulements complexes (radier déversant, etc.), il est pratiquement impossible de calculer précisément des vitesses locales. En effet, réaliser cette opération nécessiterait l'emploi des codes de calcul les plus performants et une topographie trop détaillée où chaque bloc serait décrit. Si ces deux conditions étaient remplies, les temps de calculs pour 1 km de rivière seraient considérables, même avec les matériels les plus modernes. Face à ce problème, nous avons adopté une modélisation grossière des champs de vitesse associée à la caractérisation des rapports rugosité/profondeur. Pris ensemble, ces paramètres traduisent la diversité des vitesses et la présence de zones d'ombre hydraulique dans l'habitat aquatique.

Une vitesse moyenne est calculée pour tout point topographié ou interpolé. Les principes de base de ce calcul consistent :

- à faire passer par chaque verticale un profil en travers ;
- à calculer, pour chaque verticale du profil en travers, une vitesse moyenne en utilisant majoritairement la formule de Limérinos (1970), plus adaptée que celle de Manning-Strickler pour les rivières à faible profondeur ;
- à réaliser un ajustement des vitesses moyennes pour retrouver le débit de la rivière dans le profil en travers.

Afin d'effectuer ce type de calcul, il est préconisé d'avoir réalisé un découpage de la rivière en zones homogènes en variété granulométrique, dans lesquelles auront été mesurées des rugosités. Ceci

▼ Tableau 2. – Variables de description de l'ambiance de la zone de pêche.

<p>Moyennes issues des profils en travers traversant la zone de pêche</p> <p>largeurs au miroir surfaces mouillées périmètres mouillés hauteurs d'eau moyennes rayons hydrauliques rapports largeur au miroir sur profondeur vitesses moyennes nombres de Froude moyens nombres de Reynolds moyens pentes de la surface de l'eau pentes de la ligne d'énergie</p> <p>Moyennes issues des profils en travers répartis sur 10 mètres à l'amont de la zone de pêche</p> <p>nombres de Froude moyens pentes de la surface de l'eau rugosités relatives : rapports rugosités sur hauteurs d'eau</p>
--

permet alors d'attribuer à chaque verticale située dans la zone :

- le k_{84} employé dans la formule de Limerinos ;
- le rapport rugosité moyenne/hauteur d'eau moyenne de la zone.

■ **Maillage**

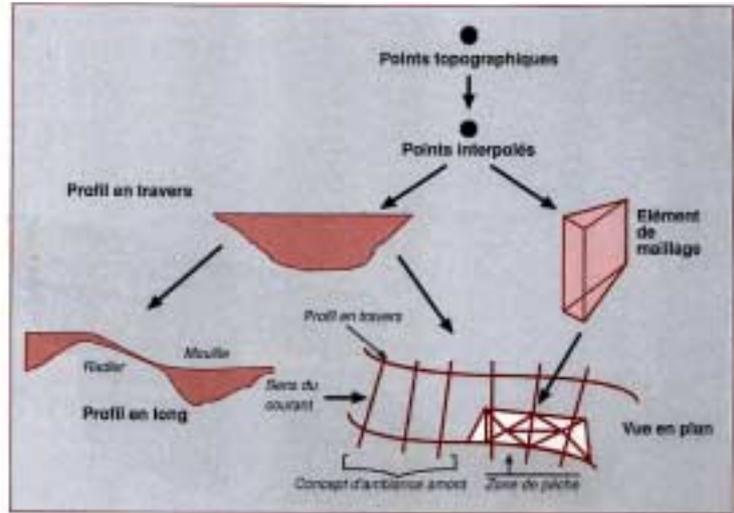
Le maillage de la rivière, de type irrégulier, est réalisé en prismes droits à bases triangulaires (figure 5). Chaque prisme est composé de 3 verticales définissant un élément de volume dont les facettes supérieure et inférieure représentent respectivement la surface de l'eau et le fond. On affecte à chacun des prismes les valeurs moyennes des paramètres physiques des verticales. Le calcul des valeurs moyennes par zone s'effectue par agglomération de mailles élémentaires. Il utilise une pondération par volume dans le cas des vitesses moyennes par exemple, ou par la surface du fond dans le cas des contraintes tangentielles.

■ **Exemple de descripteurs physiques locaux et d'ambiance**

Nous donnons ici un exemple des possibilités offertes, au travers d'une liste des variables physiques utilisées, pour rechercher des relations habitats/poissons (Parussie, 1994 ; Carrel et al., 1994).

■ **Représentations graphiques**

Des programmes informatiques conviviaux permettent :



▲ Figure 4. – Schéma de principe du traitement informatique des données.

Formule de Limerinos (1970)

Pour un profil en travers :

$$J = \frac{V^2}{33 g R [\log_{10}(3,17R/k_{84}) - 0,314 \log_{10}(R/D_{max})]^2}$$

J : pente de la ligne d'énergie en m/m :

g : accélération de la pesanteur en m²/s

V : vitesse moyenne en m/s

R : rayon hydraulique en m

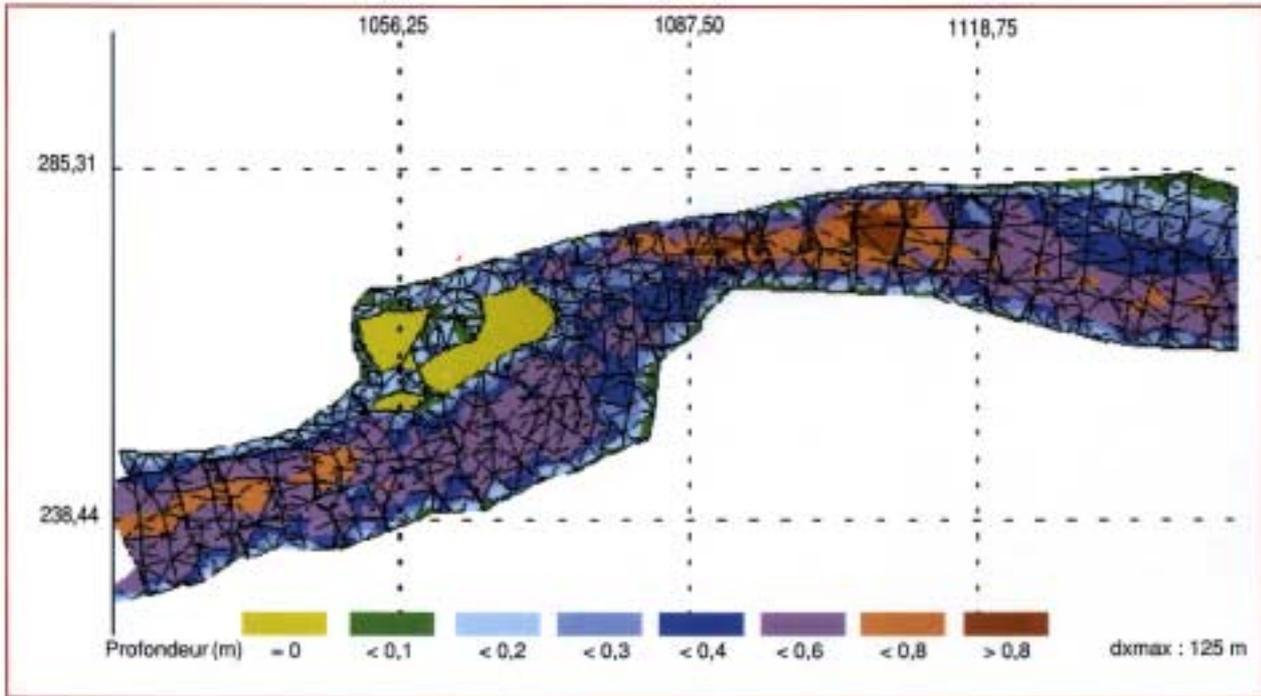
D_{max} : profondeur maximale en m

k₈₄ : rugosité en m telle que 84 % des éléments granulométriques ont une dimension inférieure à cette valeur

Notons que cette équation n'est valide que si le terme situé au dénominateur élevé au carré est positif, ce qui vérifie grossièrement que la granulométrie observée est plus petite que la hauteur d'eau.

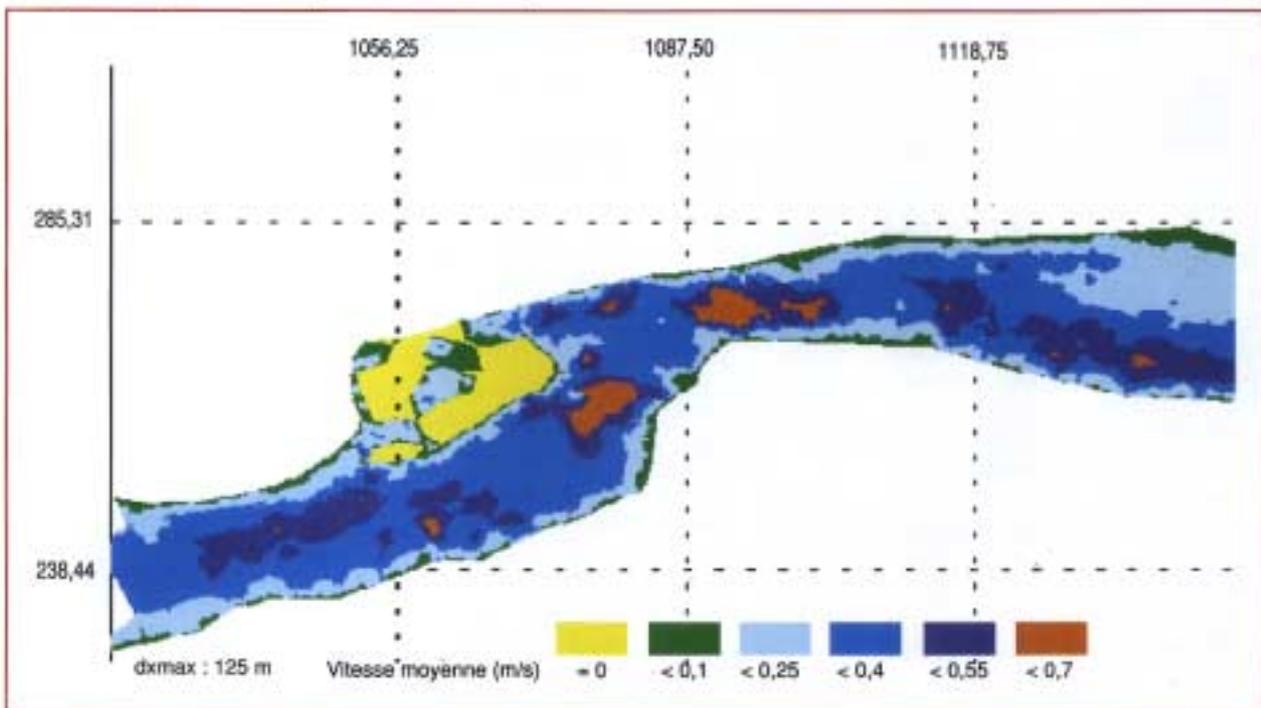
- la visualisation des profils en travers le long de l'abscisse curviligne ; l'utilisateur peut les faire défiler à volonté et obtenir leurs caractéristiques ;

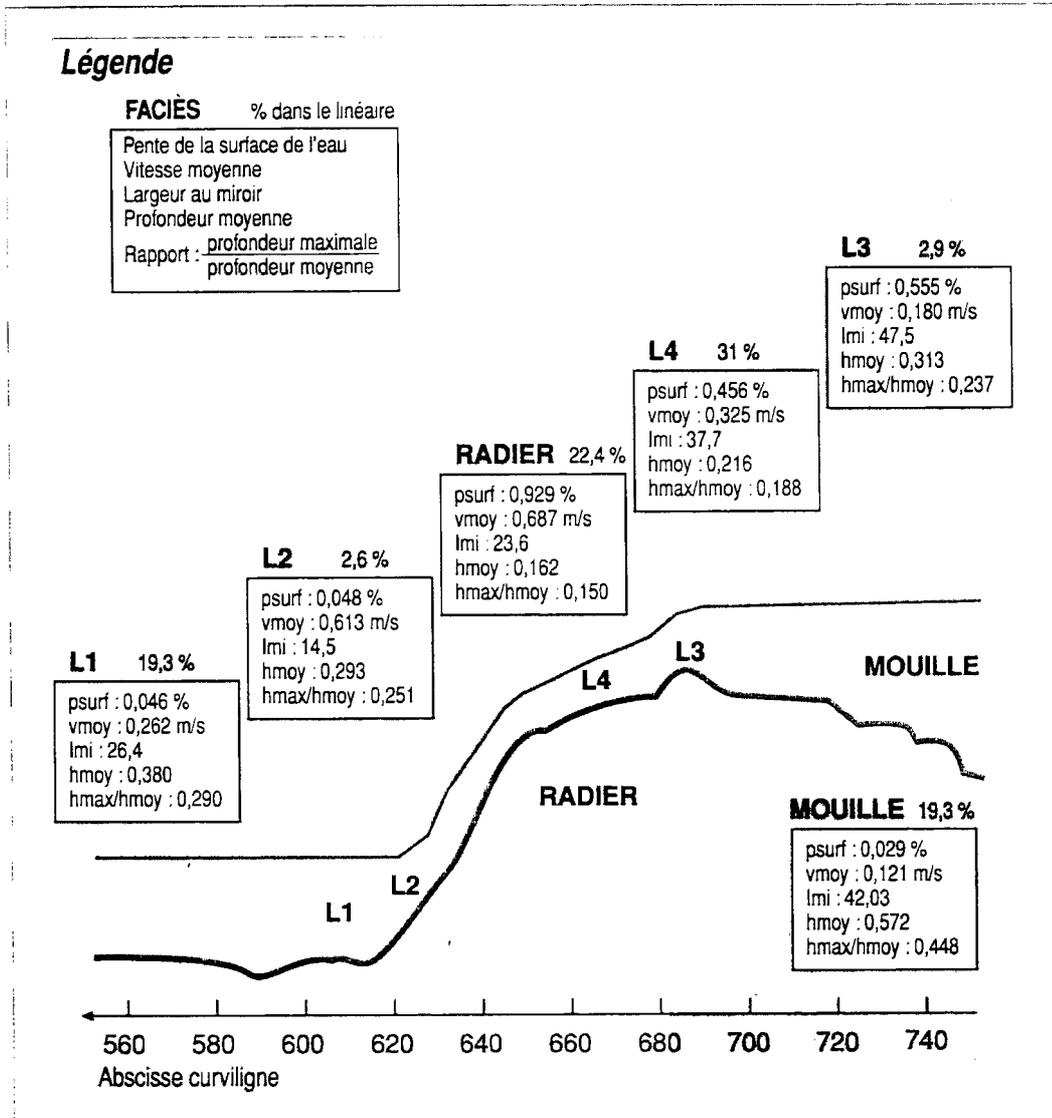
- la visualisation de la rivière en plan ou en profil en long ; l'utilisateur peut se déplacer et zoomer à volonté dans ces représentations. Il peut choisir des palettes de couleurs pour différencier les valeurs des variables numériques hydrauliques (figures 5 et 6). Des connaissances de base en programmation lui offrent la possibilité d'exprimer des requêtes telles que la coloration de zones selon un filtre de critères.



▲ Figure 5. – Représentation x-y (m) du maillage, visualisation des profondeurs.

▼ Figure 6. – Représentation x-y (m) des vitesses moyennes (m/s).





◀ Figure 7. – Exemple de sectorisation longitudinale de faciès d'écoulement effectuée sur 3 km de Durance. Représentation schématique selon un profil en long.

Perspectives

Les procédures de repérage curviligne et de maillage, la structure des fichiers qui conditionne la maîtrise topologique des rives et des polygones (zones) et la souplesse des repérages possibles sur le terrain permettent à cet outil d'être très adaptable. Nous avons pu ainsi, en quelques jours, ajouter un module de calcul et de visualisation des valeurs d'habitats pour 4 taxons de truite selon la méthode des microhabitats (Bovee, 1981 et 1982 ; Souchon *et al.*, 1989).

Rappelons que la technique présentée ici a été développée pour la recherche et n'est pas pour

l'heure commercialisable ; elle est cependant opérationnelle. Nous l'utilisons couramment pour décrire à l'échelle métrique des tronçons de 2 à 3 km de cours d'eau. Son domaine d'application possible est vaste :

- la constitution de jeux de données pour la mise au point de modèles hydrauliques, ligne d'eau, champs de vitesse, transport solide. La chaîne de traitement se limite pour l'instant aux débits topographiés ; nous souhaitons à l'avenir, intégrer un modèle hydraulique d'évolution de la ligne d'eau en fonction du débit ;

– la géomorphologie fluviale, pour la comparaison d'états de rivière avant et après une crue par exemple
– l'étude du fonctionnement biologique par la caractérisation des relations habitats/invertébrés/poissons établies au travers des densités de colonisation et des flux d'organismes dérivants.

L'un des aspects les plus prometteurs de cette démarche réside dans les possibilités d'élaboration et de test des concepts d'ambiance qui déterminent les relations des espèces avec leurs habitats. En effet, le système offre une grande liberté de définition en termes de proximité de structures et d'agréations pondérées de paramètres hydrauliques et morphologiques.

La valorisation de cette étude est réalisée en collaboration avec le *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture* qui en publiera prochainement un article.

Résumé

Afin de mieux évaluer et prendre en compte l'impact d'aménagements sur la faune des rivières, une modélisation de « rivière virtuelle » est réalisée. Les auteurs utilisent pour cela un matériel de topographie. En l'associant à des méthodes adaptées, ils améliorent la rapidité, la précision et la souplesse dans le repérage spatial des éléments morphologiques, hydrauliques et biologiques d'une rivière. Le traitement informatique des données fait appel à des techniques de repérage curviligne d'interpolation et de maillage. La structure numérique et topologique de cet outil de recherche offre de nombreuses possibilités de calculs et permet des visualisations conviviales des résultats.

Abstract

An electronic topography equipment and adapted methods provide rapidity, accuracy and flexibility in spatial location of river hydrodynamic and biological data. Data processing uses curvilinear location techniques of interpolation and gridding. The numerical and topological structure of this research tool offers numerous calculation possibilities and insures convivial presentation of the results.

Bibliographie

- BOVEE K.D., 1981. *A user guide to the Instream Flow Incremental Methodology*. U.S. Fish and Wildlife Service. Biological Services Program. Rep. n° FWS/OBS 80/52, 232 pages.
- BOVEE K.D., 1982. *A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instream flow information paper : n°12, Cooperative Instream Flow Service Group, Fish and Wildlife Service, U.S. Department of the Interior, FWS/OBS - 82/26, 248 pages.
- CARREL G., DUMONT B., LE COARER Y., RIVIER B., 1994. *Morphodynamique et biologie piscicole de la Durance dans le secteur d'Espinasses - Rochebrune*. Rapport Cemagref Aix-en-Provence, 45 pages.
- LECLERC M., BOUDREAU P., BECHARA J., BELZILE L., VILLENEUVE D., 1994. Modélisation de la dynamique de l'habitat des jeunes stades de saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Ashuapmushuan (Québec, Canada). *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 332, 11-32.
- LIMERINOS J.T., 1970. *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. U.S. Geol. Survey Water Supply paper. 1898 B, 47 pages.
- PARUSSIE M., 1994. *Modélisations des relations habitat/truite fario dans le cas d'une rivière à débit réservé : La Durance à l'aval de Serre-Ponçon*. Mémoire de 3^e année. Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg. 100 pages.
- SOUCHON Y., TROCHERIE F., FRAGNOUD E., LACOMBE C., 1989. Les modèles numériques des micro-habitats des poissons : application et nouveaux développements. *Sci. Eau* 2 : 807- 830.