

Relations entre paysage hydrologique et peuplements biologiques. Rôle des zones humides

Céline Le Pichon¹, Guillaume Gorges¹, Nicolas Dumoulin², Thierry Faure², Philippe Boët¹

¹ Cemagref UR HBAN, Parc de Tourvoie 92163 Antony cedex. celine.lepichon@cemagref.fr

² Cemagref LISC, BP 50085, 63172 Aubière cedex 1, thierry.faure@cemagref.fr

1. Structure spatiale du paysage aquatique et peuplement piscicole

Le modèle biologique retenu est le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), choisi comme représentant du groupe fonctionnel des espèces rhéophiles. Les paramètres du modèle d'accessibilité sont définis en tenant compte des capacités migratoires de cette espèce lors de la reproduction et des différences de qualité des milieux traversés. La définition de ces paramètres étant étroitement liée à la taille du poisson, une étude préalable a été réalisée pour choisir la gamme de tailles pertinentes.

1.1. Gamme de tailles retenues

Nous nous fondons sur les résultats de Philippart (1979) concernant des populations de Cyprinidés de l'Ourthe.

La maturité est acquise vers 2 et 3 ans pour 50% des barbeaux mâles, entre 8 et 10 ans pour les femelles. Ceci correspond à une taille minimale de 150 mm pour un mâle mature susceptible d'effectuer une migration de reproduction et une taille de 300 mm pour une femelle mature.

On peut définir ainsi un seuil de taille minimal de 150 mm.

Pour définir la taille médiane, on tient compte de la structure par classe d'âge de la population. Les classes d'âge les plus fréquentes ont entre 4 et 6 ans, soit une taille de 300-350 mm.

La taille maximale prise en compte est liée aux femelles, lesquelles sont alors les plus fréquentes. La fécondité maximale des femelles est atteinte vers 10-12 ans, ce qui correspond à des tailles de 500 mm.

On choisi donc trois gammes de taille de barbeau pour l'étude des capacités migratoires : 150, 300 et 500 mm.

1.2. Distance moyenne parcourue par un adulte mature lors de la période de reproduction, paramètre α

La distance moyenne est comprise entre 2 000 et 6 000 m (cf. Le Pichon *et al.* 2004).

1.3. Résistance des différents habitats traversés lors d'une migration de reproduction

La gamme de résistance attribuée aux habitats est calculée en fonction des variables cartographiées disponibles et de leur pertinence par rapport au déplacement du poisson. On a donc tenu compte de la vitesse du courant par rapport aux capacités de nage du barbeau, de la hauteur d'eau

qui influe sur la prédation aviaire potentielle, et de la présence d'abris qui permettent le repos et le refuge.

Il convient de noter que si des données existent concernant les capacités de nage et l'amplitude des mouvements du barbeau, les préférences qualitatives d'habitats lors des mouvements et des migrations sont en revanche peu documentées. On fait donc un certain nombre d'hypothèses à partir des préférences d'habitats générales connues.

1.3.1 Vitesse du courant et capacités de nage du barbeau

Les capacités de nage du barbeau peuvent être définies par deux vitesses, toutes deux fonction de la taille corporelle :

Vitesse critique pour des cyprinidés, calculée d'après (Wolter & Arlinghaus 2003)

$$V_{\text{critique}} = 0,019 \times \text{Taille}^{0,75}$$

Vitesse de croisière

$$V_{\text{croisière}} = 2 \text{ à } 3 \times \text{Taille (Pavlov 1989)}$$

$$V_{\text{croisière}} = 1,5 \times \text{Taille (Lucas \& Batley 1996) pour un poisson de 500 mm dans un courant de 0,5m/s, soit 0,75 m/s.}$$

On compare ensuite les capacités de nage avec la vitesse du courant cartographiée, puis on attribue des notes, selon les hypothèses suivantes lesquelles sont ensuite déclinées selon les tailles de poisson dans le tableau ci-dessous.

Si $V_{\text{courant}} > V_{\text{critique}}$	Note 0
Si $V_{\text{courant}} > V_{\text{croisière}}$	Note 0,2
Si $V_{\text{courant}} = V_{\text{croisière}}$	Note 0,4
Si $V_{\text{courant}} < V_{\text{croisière}}$	Note 1

Taille (mm)	V_{critique} (m/s)	$V_{\text{croisière}}$ (m/s)	Note attribuée en fonction de V_{courant} (m/s)				
			0 (V1)	< 0,2 (V2)	0,2-0,5 (V3)	0,5-1 (V4)	1-1,5 (V5)
150	0,8	0,3-0,45	1	1	0,4	0,1	0
300	1,4	0,6-0,9	1	1	1	0,4	0,2
500	2	0,75-1,5	1	1	1	1	0,4

1.3.2 Hauteur d'eau et évitement comportemental lié à la prédation

Des préférences d'habitat à 75% concernant la hauteur d'eau ont été établies selon des classes de taille du barbeau (Baras 1992) : les 150-200 mm sont présents dans la gamme 20-60 cm ; les 300-350 sont présents dans la gamme 50-100 cm et les > 400 mm dans la gamme 60-170 cm. A partir de ces indications, qui ne concernent pas forcément une préférence lors d'un déplacement, et des données antérieures (rapport 2004) on attribue les notes présentées dans le tableau ci-dessous.

Taille (mm)	Note attribuée en fonction de la hauteur d'eau	
	Hauteur < 1m (P)	Hauteur > 1m (R)
150	1	0,3
300	0,66	1
500	0,25	1

1.3.3 Présence d'abris et choix des zones de repos et de refuge

La fréquentation des abris est aussi étudiée en fonction de la taille (Baras 1992). Le pourcentage de présence dans les abris est modélisé selon la saison (hiver ou été) par une relation logarithmique en parallèle à l'augmentation de taille. De plus, le type d'abris est considéré : enrochements, végétation rivulaire ligneuse, herbiers. Seulement 10% des individus de 150 mm fréquentent les abris, alors que l'on observe 50% des 300 mm et 70% des 500 mm. À partir de ces observations, on attribue les notes ci-dessous.

Note attribuée en fonction des abris				
Taille (mm)	Ripisylve et embâcles absentes (Rio Eo)	Ripisylve absente embâcles présentes (Rio E+)	Ripisylve présente embâcles absentes (Ri+ Eo)	Ripisylve et embâcles présentes (Ri+ E+)
150	1	0,3	0,3	0,3
300	0,33	0,66	0,66	1
500	0,2	0,6	0,6	1

1.3.4 Attribution des notes aux différents habitats de la rivière

Pour chaque taille de poisson, la résistance attribuée à un type d'habitat est calculée à l'aide de la formule suivante :

Résistance de l'habitat A = $1 / (\text{note Vitesse de A} * \text{note hauteur d'eau de A} * \text{note abris de A})$

avec Résistance = 500 si note Vitesse * note hauteur d'eau * note abris = 0

Ces calculs conduisent aux notes rassemblées dans le Tableau I, lesquelles servent ensuite à la réalisation de cartes de résistance (Figure 2).

1.3.5 Fonction de probabilité : formes disponibles

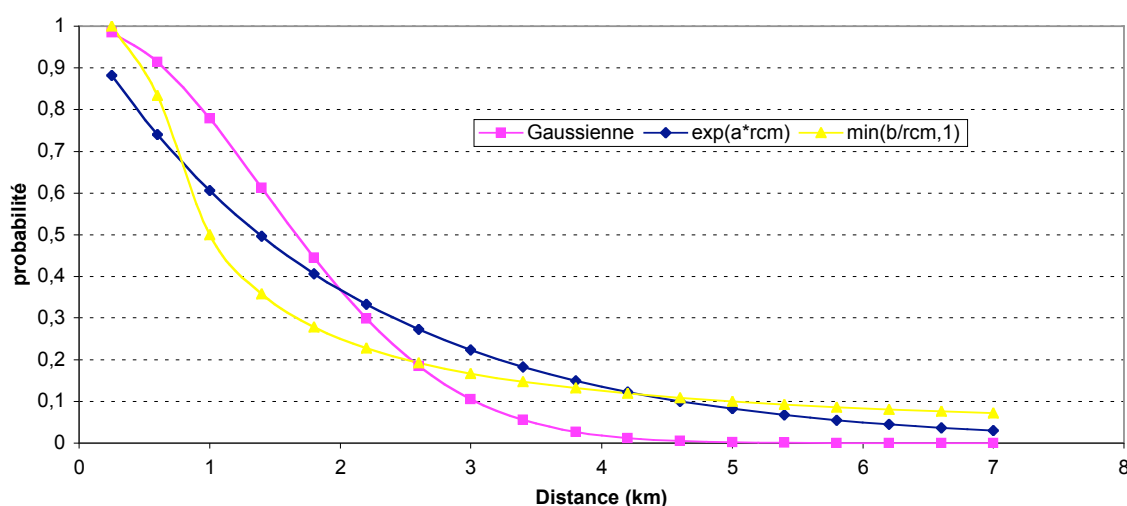


Figure 1. Fonction de probabilité de déplacement.

Nous utilisons les données de Philippart (1977), qui a effectué des opérations de capture/marquage/recaptures pour estimer les distances parcourues par des barbeaux à partir du centre de marquage.

Trois fonctions de régression sont testées pour décrire l'évolution des déplacements : une gaussienne, sous la forme $\exp(-rcm^2/\alpha)$ avec $\alpha=2000$, une exponentielle décroissante $\exp(-\alpha*rcm)$, et une fonction inverse de la distance, normalisée à 1 en utilisant la fonction $\min(\alpha b/rcm,1)$, avec αa et $\alpha b=0,5$ calculés numériquement.

Tableau I. Notes attribuées aux types d'habitat présents dans le bief sub-naturel en fonction de la taille du poisson. Ces notes servent à la réalisation des cartes de résistance (Figure 2).

TYPE	Résistance		
	Poisson 500 mm	Poisson 300 mm	Poisson 150 mm
V1 P Ri+ Eo	7	2	3
V1 P Rio Eo	20	5	1
V2 P Ri+ E+	4	2	3
V2 P Ri+ Eo	7	2	3
V2 P Rio E+	7	2	3
V2 P Rio Eo	20	5	1
V2 R Ri+ E+	1	1	11
V2 R Ri+ Eo	2	2	11
V2 R Rio E+	2	2	11
V2 R Rio Eo	5	3	3
V3 P Ri+ E+	4	2	8
V3 P Ri+ Eo	7	2	8
V3 P Rio E+	7	2	8
V3 P Rio Eo	20	5	3
V3 R Ri+ E+	1	1	28
V3 R Ri+ Eo	2	2	28
V3 R Rio E+	2	2	28
V3 R Rio Eo	5	3	8
V4 P Ri+ E+	4	4	33
V4 P Ri+ Eo	7	6	33
V4 P Rio E+	7	6	33
V4 P Rio Eo	20	11	10
V4 R Ri+ E+	1	3	111
V4 R Ri+ Eo	2	4	111
V4 R Rio E+	2	4	111
V4 R Rio Eo	5	8	33
V5 P Ri+ Eo	17	11	500
V5 P Rio Eo	50	23	500
V5 R Ri+ Eo	4	8	500
V5 R Rio E+	4	8	500
V5 R Rio Eo	13	15	500

On notera que les gammes de résistances sont relatives à une taille donnée et ne présentent pas les mêmes amplitudes. Des comparaisons de valeurs entre tailles n'ont pas de réelle signification.

La Figure 2 présente un exemple de la répartition spatiale des résistances sur un méandre du bief sub-naturel, selon la taille du poisson. On peut ainsi observer que les poissons de grande taille se déplaceront préférentiellement dans les zones d'assez fort courant du chenal et éviteront les berges trop peu profondes, tandis que les poissons de petite taille se déplaceront au contraire sur les zones moins courantes et de faible profondeur.

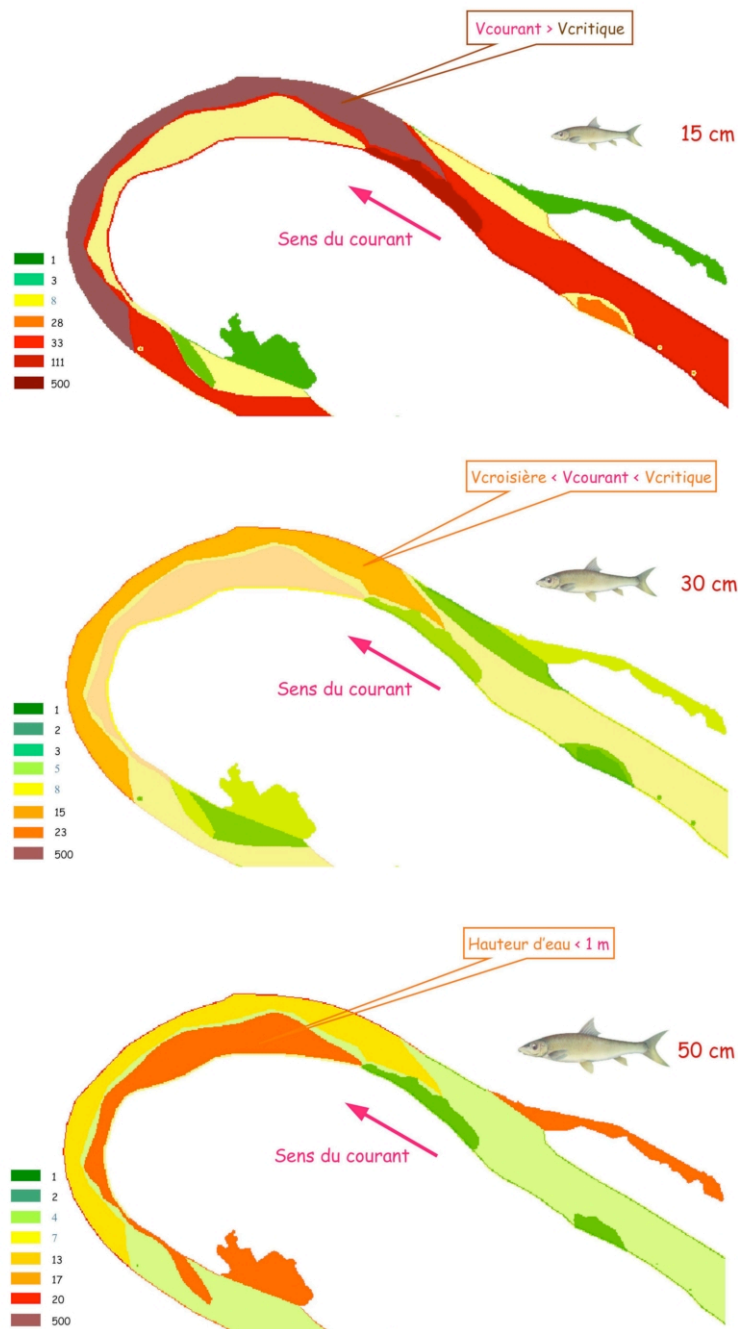


Figure 2. Exemple de gamme de résistances attribuées aux habitats d'un méandre du bief sub-naturel, en fonction de la taille du poisson (barbeau de 15, 30 et 50 cm).

1.4. Utilisation des résistances pour évaluer la complémentarité entre zone d'alimentation et zone de repos.

Les cartes de résistances sont utilisées pour calculer la carte de résistance cumulée minimale (RCM) à partir de toutes les zones d'alimentation présentes, à l'aide de Arcview 8.2[®]. Cette carte est ensuite superposée à celle des zones de repos (Figure 3). On définit une zone de complémentarité lorsqu'une ou plusieurs zones de repos font partie de la zone d'accessibilité d'une zone d'alimentation, définie par une RCM seuil (ici 500 équivalents mètres).

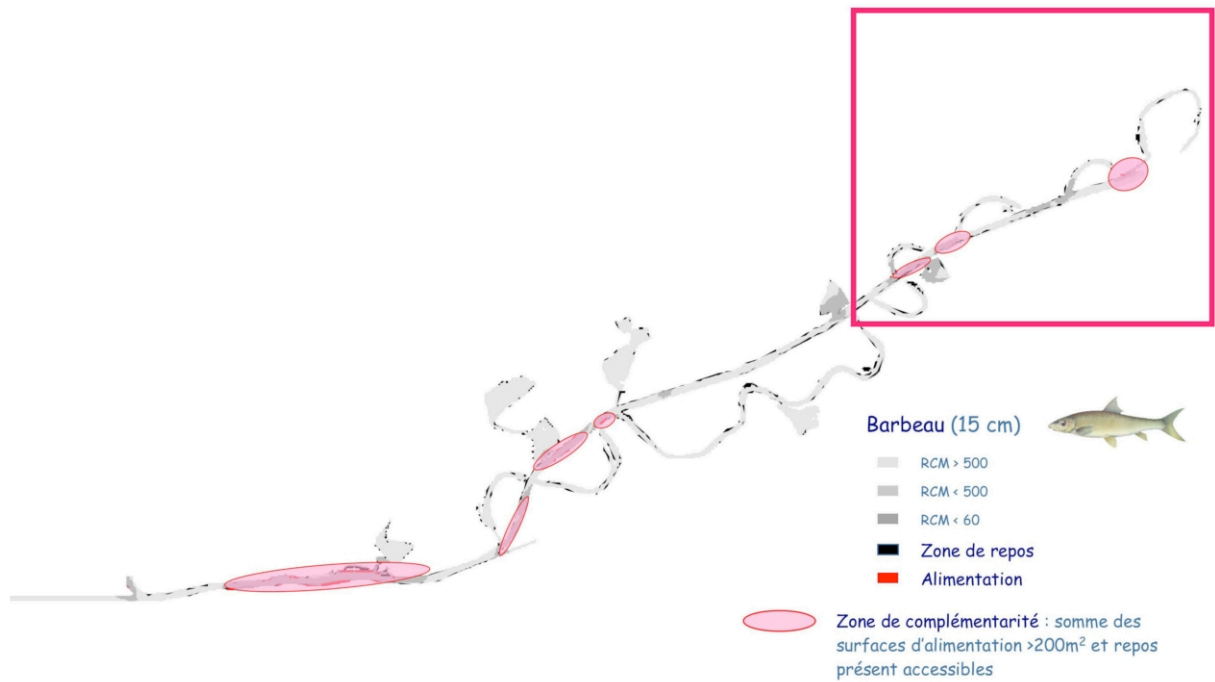


Figure 3. Complémentarité des zones de repos et d'alimentation. Des zones de repos doivent être comprises dans le domaine d'accessibilité des zones d'alimentation, défini ici par une RCM < 500.

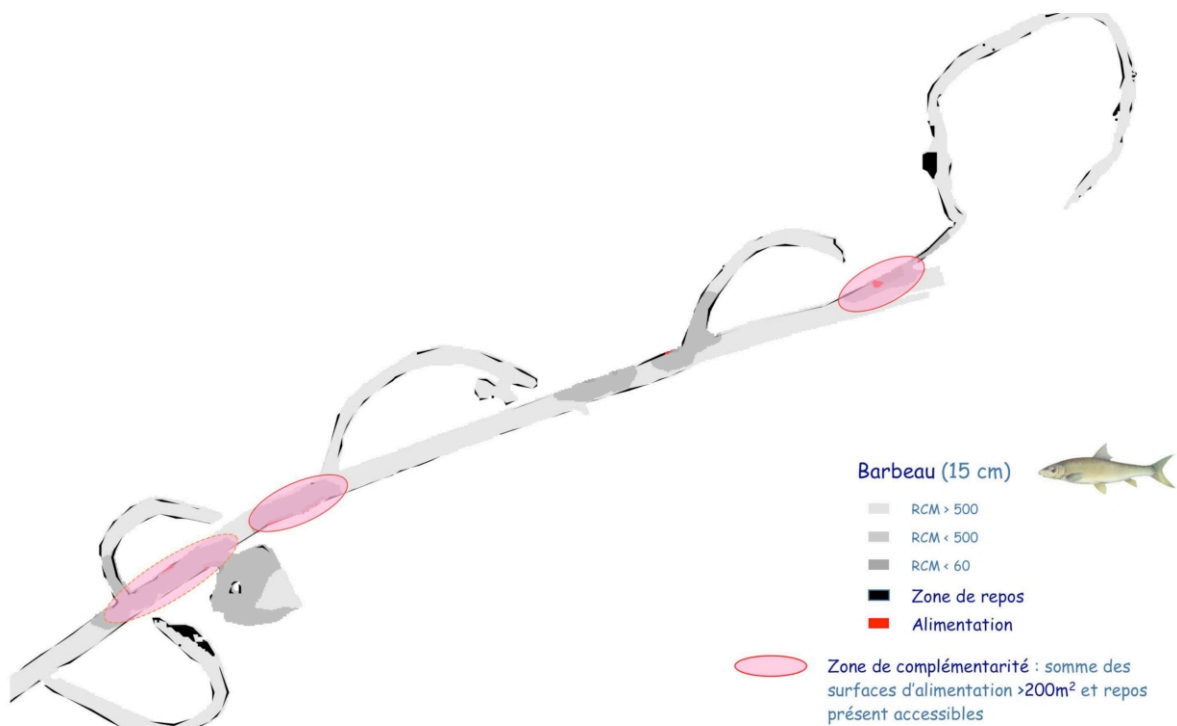


Figure 4. Zoom de l'encadré de la Figure 3.

2. Modélisation de la dynamique spatiale des poissons de rivières

L'utilisation de modèles pour étudier les phénomènes écologiques s'est beaucoup développée ces dernières années, notamment avec l'augmentation de la puissance de calcul. Élaborer un modèle permet de tester des hypothèses sur les dynamiques internes d'un système.

Dans le cas des poissons de rivière, nous nous intéressons à la dynamique spatiale engendrée par leurs déplacements. De tels modèles permettront d'étudier l'impact de scénarios de gestion sur l'occupation de l'espace par les poissons. Le premier modèle développé dans ce contexte est appliqué au barbeau fluviatile.

2.1. Développement d'un cadre de modélisation pour la faune aquatique

2.1.1 L'approche individus centrée comme outil de modélisation

La modélisation d'écosystèmes peut être réalisée au moyen de deux principales approches. La première consiste à modéliser l'évolution de variables agrégées au cours du temps, en formalisant sous forme d'équations la dynamique globale du système. La seconde approche est la modélisation dite individus centrée (IBM pour *Individual-based model*) qui consiste à représenter explicitement le comportement de chaque individu, ainsi que ses interactions avec les autres individus et l'environnement.

Cette approche est retenue car elle permet de représenter explicitement le déplacement des individus. L'expression des hypothèses de modélisation concernant le comportement des individus est ainsi beaucoup plus souple et permet d'inclure de nombreux processus.

Cependant, de tels modèles peuvent rapidement devenir complexes dès lors que l'on augmente leur degré de liberté. Ce nombre de degré de liberté est de l'ordre du produit du nombre d'individus, multiplié par le nombre de paramètres de chaque individu. Pour limiter l'introduction de nouvelles variables, mais également pour pallier le manque de données sur certains phénomènes, les modèles individus-centrés recourent à des processus stochastiques. En particulier, ceci est utilisé pour générer la distribution initiale des individus (par exemple, distribution en taille, ou en nombre...), mais aussi pour définir leur localisation spatiale. Cette stochasticité ajoute du réalisme au modèle qui devient non-déterministe. Cependant, ce non-déterminisme nécessite de multiplier les simulations avec les mêmes paramètres, afin de moyenniser les comportements observés qui subissent les aléas de ces processus stochastiques.

2.1.2 En utilisant une double modélisation

Pour pallier ces limitations inhérentes des modèles individus centrés, nous proposons une méthodologie originale pour comprendre et prédire des comportements globaux issus de dynamiques. Pour cela, nous proposons d'utiliser des modèles individus-centrés comme source d'expérimentation. Il s'agit donc d'une « double modélisation » puisqu'il faut développer le modèle individus-centré et le modèle de ses comportements globaux (Figure 5). Cette méthodologie est plus générale que celle proposée par Grimm (1996) en utilisant des patrons écologiques.

Dans la double modélisation, le comportement du modèle individus-centré devient un phénomène complexe à modéliser, à l'instar d'un phénomène naturel. La différence, très importante, est qu'une grande variété d'expérimentations est facilement accessible, à un coût très faible puisque les expérimentations sont des simulations du modèle individus-centré. Une telle richesse d'expérimentations est en général hors de portée sur le système réel.

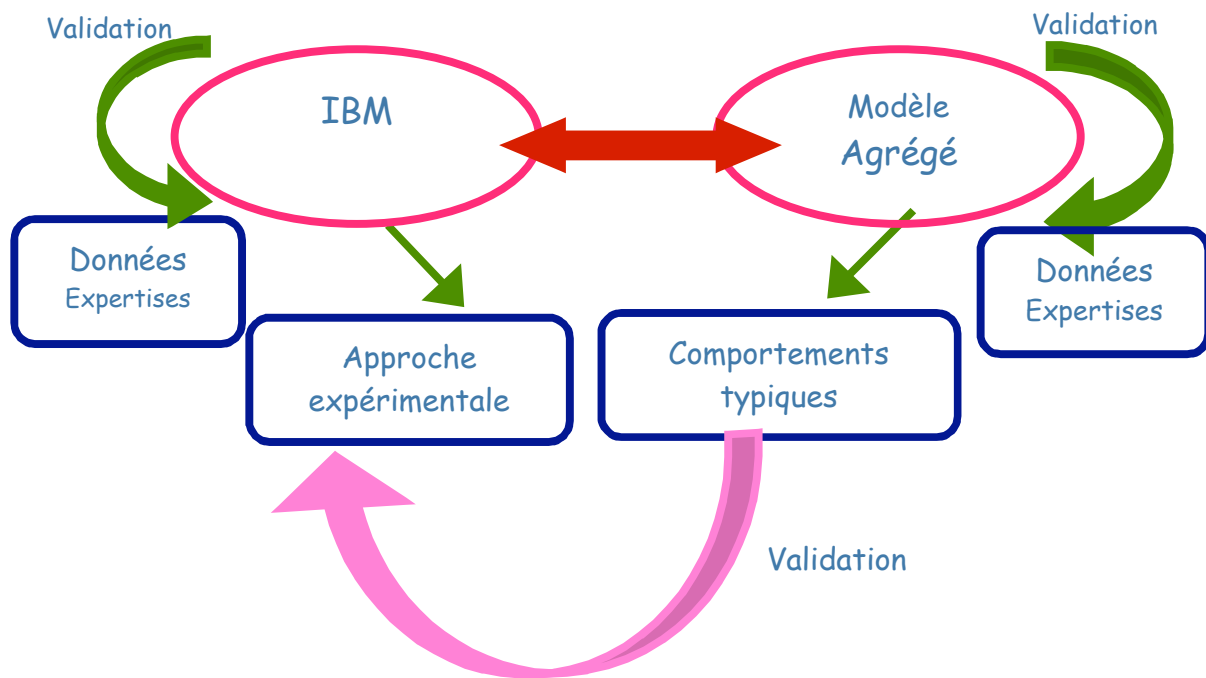


Figure 5. Les modèles individus centrés (IC) sont utilisés comme source d'expérimentation permettant d'identifier des comportements globaux statistiquement robustes et d'expliquer leur lien avec les dynamiques individuelles. Le modèle agrégé peut être statistique (le plus simple étant la moyenne et un intervalle de confiance d'une variable agrégée) ou exprimant directement les dynamiques de variables agrégées. La mise au point de ce modèle utilise des plans d'expériences sur le modèle IC. Lorsque les comportements statistiquement robustes sont identifiés de manière satisfaisante, ils peuvent être comparés à des observations sur le système réel. Cette comparaison peut suggérer des modifications du modèle individu-centré, grâce à la compréhension du lien entre dynamiques individuelles et comportements collectifs émergents, apportée par le modèle agrégé (voir le texte pour plus de détails).

Il est donc possible de développer un modèle des comportements globaux statistiquement robustes issus des dynamiques individu-centrées en pratiquant un grand nombre d'expérimentations. Ce modèle peut être statistique et, même dans le cas les plus simples, se réduire à la courbe moyenne d'une variable agrégée assortie d'un intervalle de confiance. Dès que la dimension de l'espace s'accroît, il devient nécessaire de faire davantage d'hypothèses sur le modèle statistique, mais aussi sur le choix des expérimentations pour le construire. Ce modèle peut également être fondé sur les dynamiques de variables agrégées ou des distributions de probabilité. Il s'agit alors d'une approximation de comportements agrégés du modèle individu-centré. La mise au point d'un tel modèle requiert également d'expérimenter sur le modèle IBM.

Une fois que le modèle agrégé présente un degré d'adéquation suffisant avec le modèle individus-centré, on peut l'utiliser pour définir des expérimentations réelles, beaucoup plus ciblées, correspondant aux comportements typiques ou critiques attendus, ou encore le comparer à des observations existantes. La compréhension des liens entre les dynamiques individuelles et les comportements globaux, apportée par le modèle agrégé permet en outre de faire évoluer de manière pertinente le modèle individus-centré, au vu des résultats des expérimentations réelles. On peut ainsi repartir pour un nouveau cycle de « double modélisation ».

2.1.3 Un cadre générique pour modéliser la faune aquatique

Pour développer un modèle individus centré sous forme logicielle, le développeur a souvent recours au paradigme de programmation orientée objet (POO) (Bian 2000, 2003), lequel facilite la conception de son application car il permet d'associer directement les entités réelles aux entités informatiques. Le formalisme UML (*Unified Modelling Language*) proposé par l'OMG (*Object Management Group*) permet de représenter les interactions entre les objets en faisant abstraction de leur implémentation. L'OMG propose également le paradigme MDA (*Model Driven Architecture*) qui a pour but d'accentuer cette séparation entre la partie « métier » et la partie technologique.

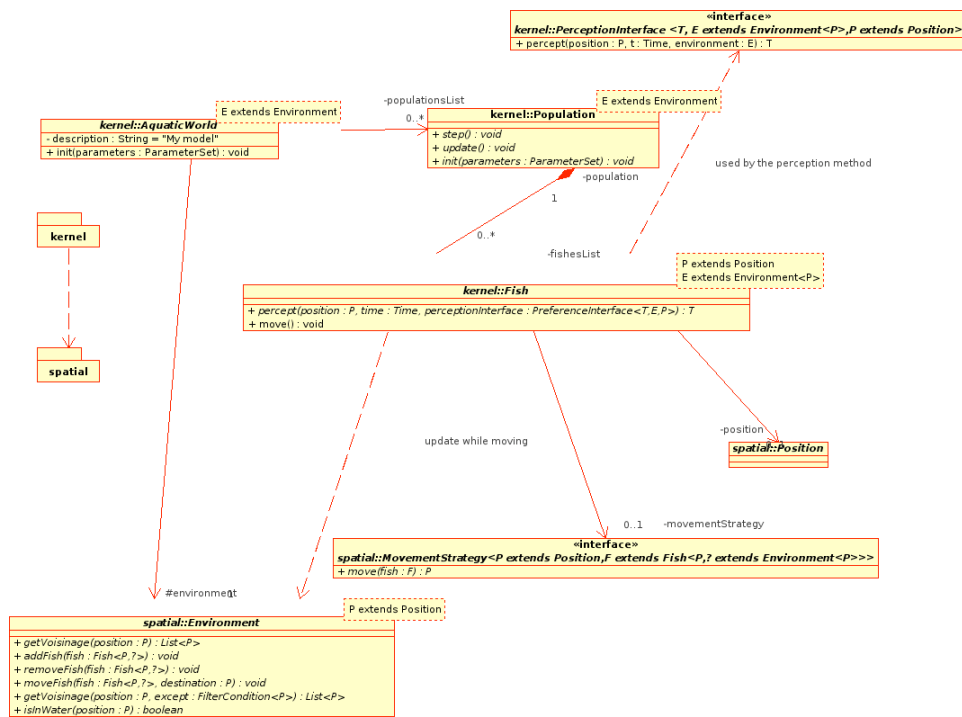


Figure 6. Partie principale du cadriciel développé.

Dans notre cas, le développement de modèles concernant la faune aquatique peut être *factorisé* en concevant un méta-modèle qui décrit les principaux concepts liés à ces modèles. Nous avons implémenté ce méta-modèle sous forme d'un cadriciel (contraction de cadre logiciel) générique en langage Java. L'illustration 1 présente le diagramme de classes de la partie centrale du cadriciel.

L'aspect générique rend le développement des modèles s'appuyant sur ce cadriciel très souple, et offre des mécanismes prêts à l'emploi de manière transparente.

Une extension à cet ensemble de classes est développée pour prendre en compte les modèles en deux dimensions. Cette extension définit le positionnement dans un espace discret à deux dimensions, ainsi que les primitives de mesure de distance et de tri.

Cette extension est basée sur la plate-forme multi-agents Repast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit¹) développée en java. C'est une plate-forme générique, pour la modélisation des comportements d'agents, de sociétés, d'organisations et d'institutions, qui est particulièrement adaptée pour la modélisation sociale.

¹ Repast, Recursive Porous Agent Simulation Toolkit, <http://repast.sourceforge.net/>

Outre qu'elle soit écrite en Java, un des intérêt du choix de Repast comme base de notre cadriciel est qu'elle présente un certains nombre d'outils prédéfinis pour gérer une simulation (gestion du temps notamment) et pour visualiser les résultats (bibliothèques graphiques).

2.2. Application à la modélisation du cycle de vie du barbeau sur la plaine de La Bassée

Le modèle biologique retenu est donc le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), choisi comme représentant du groupe fonctionnel des espèces rhéophiles. Les paramètres du modèle sont définis en tenant compte des différentes étapes du cycle de vie de cette espèce, obtenus à partir d'éléments bibliographiques (Baras 1992, Lucas & Baras 2001).

2.2.1 Les objectifs de modélisation

L'objectif de cette application est de proposer un outil d'aide à la compréhension de l'occupation d'une portion de rivière par l'espèce étudiée. À partir de données sur les zones fonctionnelles d'une portion de rivière et de comportements d'un poisson (Baras 1992), l'application simule les déplacements des individus entre ces zones. Ces résultats de simulation permettent alors d'observer le comportement du modèle à plusieurs échelles temporelles et spatiales :

- *L'échelle journalière* est le premier niveau fonctionnel qui correspond aux déplacements quotidiens des barbeaux entre les zones de repos et d'alimentation. Cette échelle comprend un espace local de l'ordre du kilomètre.
- *L'échelle saisonnière* comporte le premier niveau fonctionnel auquel s'ajoutent les migrations de reproduction qui couvrent plusieurs kilomètres. Elle prend en compte le cycle de vie complet d'un barbeau ; c'est à cette échelle que se définit une sous-population.
- *L'échelle d'une métapopulation* intègre les phénomènes intervenant au sein d'une métapopulation, c'est-à-dire les interactions entre les sous-populations locales (extinction, recolonisation principalement).

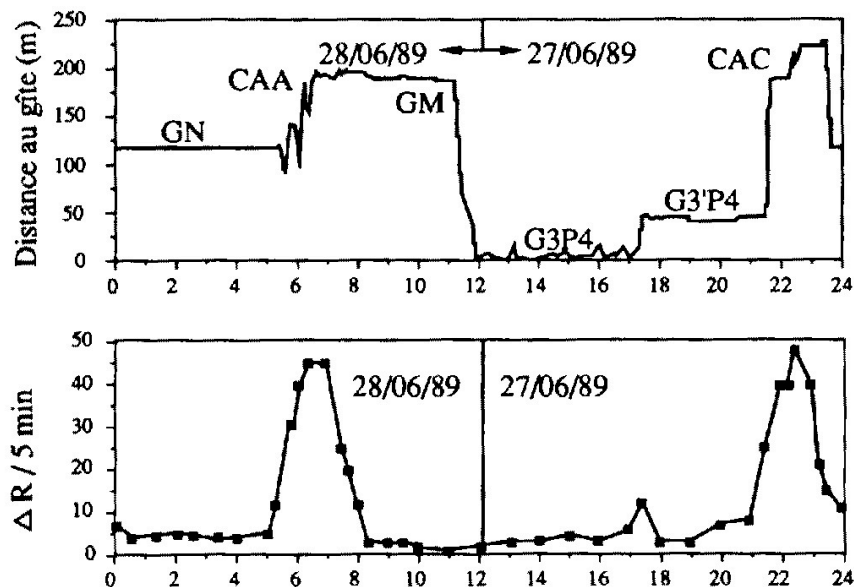


Figure 7. Patrons journaliers des déplacements du barbeau pour la période estivale (d'après Baras 1992).

2.2.2 Description du modèle

Les processus biologiques retenus

Nous considérons que chaque jour, les barbeaux effectuent deux cycles d'activité repos-alimentation, le premier à l'aurore, et le second au crépuscule. Ce patron temporel bimodal d'activité est dans un premier temps calé avec les données observées par *radio-tracking* sur les barbeaux de l'Ourthe (Baras, 1992). Un exemple de patron observé est illustré Figure 7, sur laquelle on peut voir les tranches horaires de déplacement en zone d'alimentation.

Les données cartographiques utilisées

Pour initialiser l'environnement physique des barbeaux, nous utilisons les cartes correspondant aux couches physiques, décrivant pour chaque pixel de résolution 1 m x 1 m, la nature du lieu. Cette nature peut être caractérisée par la fonction associée à la portion de l'espace concernée comme sur la Figure 8, mais elle peut également l'être par d'autres caractéristiques dépendantes des couches physiques utilisées.

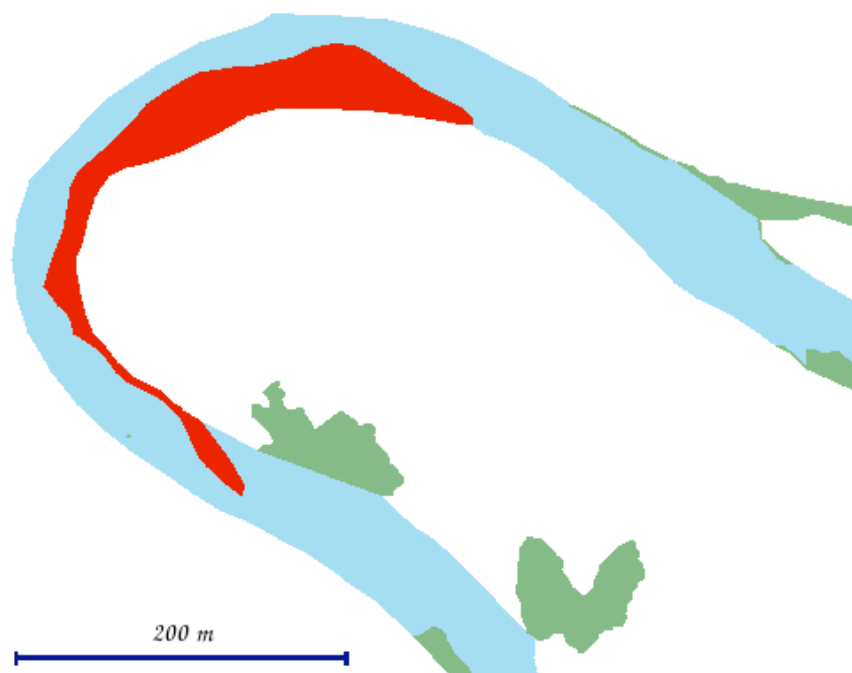


Figure 8. Représentation d'un exemple de couche physique utilisé pour initialiser l'environnement. En vert les zones de repos, en rouge les zones d'alimentation, et en bleu le reste de la rivière (aucune fonction associée).

Processus de déplacement du poisson dans l'environnement

Lorsqu'un individu part à la recherche d'une zone fonctionnelle, c'est-à-dire, soit une zone d'alimentation, soit une zone de repos, il choisit la position la plus proche de lui à cet instant donné qui correspond à la fonction recherchée. Pour éviter de devoir parcourir tous les pixels de l'environnement à chaque recherche de cette zone, la structure de donnée qui stocke la couche physique possède également deux grilles grossières, une pour chaque fonction : repos et alimentation.

Dans l'ordre, le barbeau en recherche d'une zone fonctionnelle regarde, d'abord s'il en existe une dans la cellule correspondant à sa position dans la grille grossière et concernant la fonction recherchée, puis, le cas échéant, dans le voisinage de Moore (c.-à-d. les plus proches voisins au sens topologique) de cette cellule de la grille grossière. Enfin, s'il n'a toujours pas trouvé la zone recherchée, le barbeau étendra sa recherche par voisinage croissant.

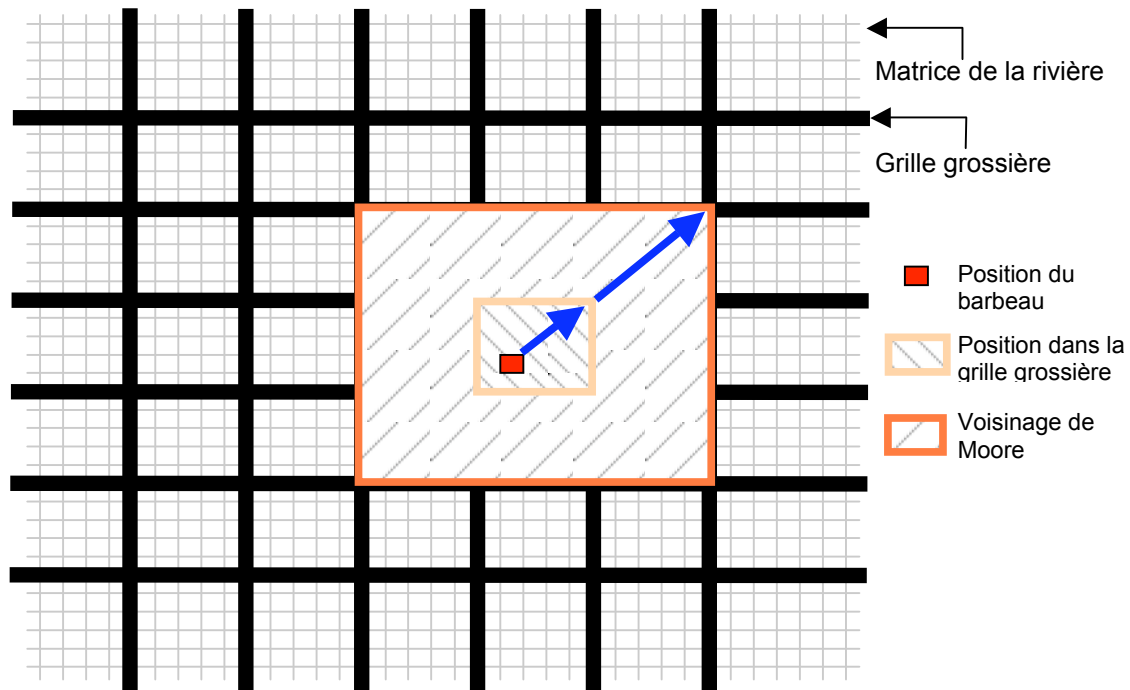


Figure 9. Grille pour la recherche des zones de repos et d'alimentation

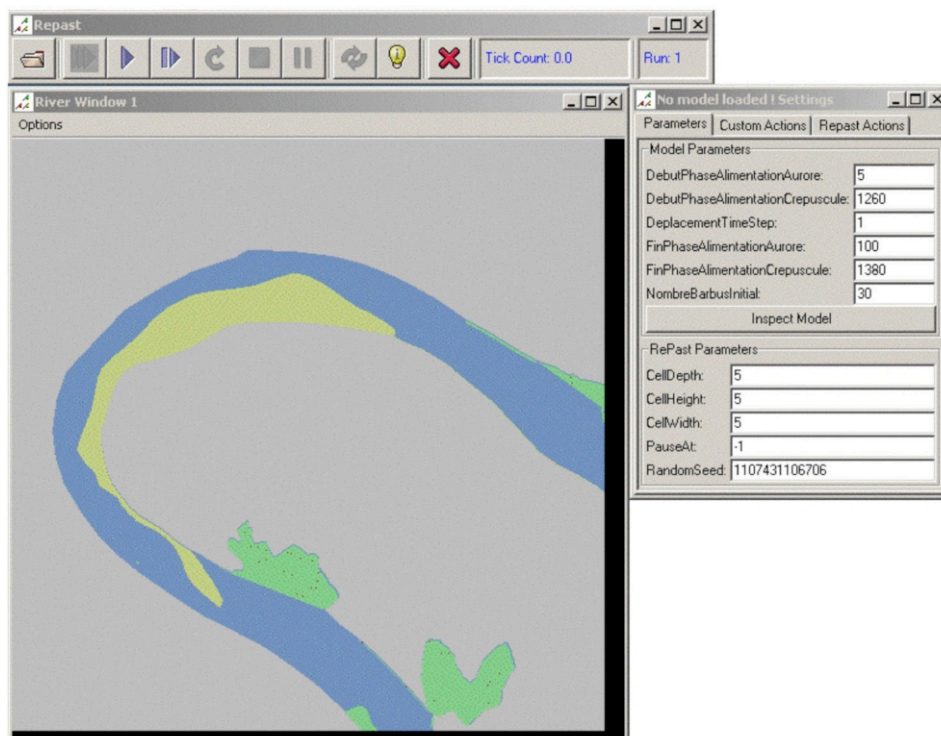


Figure 10. Interface graphique d'initialisation et de visualisation des déplacements des poissons. (NB :seule une portion du bief est sélectionnée).

2.2.3 Premiers résultats de simulation pour le déplacement journalier des barbeaux

Nos premières simulations utilisent la couche physique présentée précédemment et sont illustrées Figure 11, qui représente une matrice de 500 par 500 pixels avec un grain d'un mètre, extraite du bief étudié.

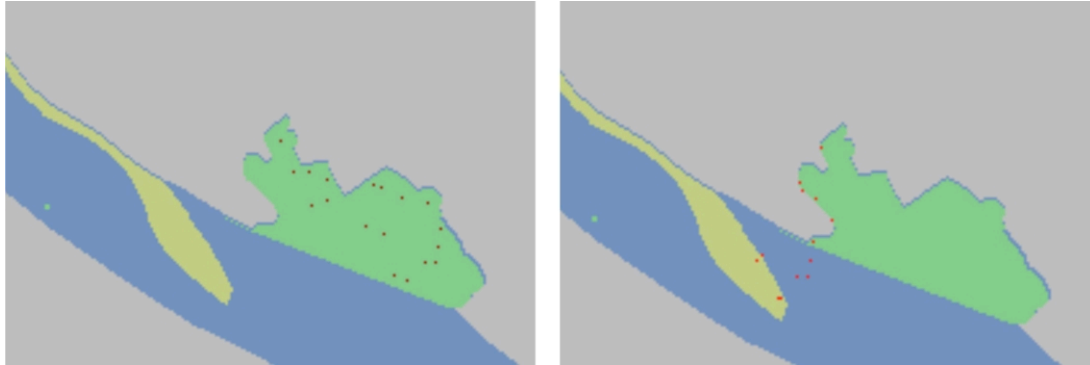


Figure 11. Initialisation (à gauche) tous les barbeaux (points rouges) sont en zone de repos. Puis, ils se déplacent vers la zone d'alimentation (à droite).

Cette figure montre l'intérêt d'utiliser une grille multi-résolutions, comparé à ce qui est habituellement fait en utilisant une recherche aléatoire de cible. En effet, on évite ainsi un parcours de tout l'espace.

Ces premières expérimentations numériques du modèle IBM-barbeau montrent la faisabilité du modèle. Néanmoins, il reste du travail à réaliser, pour améliorer les vitesses de simulation afin de prendre en compte des domaines de modélisation plus larges, pour valider le modèle au regard des résultats de pêches *in situ* et des indices d'analyse spatiales adaptés au paysage aquatique, pour adapter enfin ce cadriciel à d'autres espèces.

3. Conclusion et perspectives

Dans les deux secteurs «sub-naturel» et «aménagé» de la plaine alluviale de La Bassée, choisis pour développer les outils méthodologiques visant à caractériser et à quantifier la structure spatiale des habitats piscicoles, des indices adaptés de l'écologie du paysage sont calculés au moyen d'un outil logiciel.

Ces indices concernent les problèmes de répartition, d'accessibilité et de complémentarité des trois types d'habitats fonctionnels au sein de la mosaïque du paysage sub-aquatique : habitat de reproduction, d'alimentation et de repos. Leur représentation cartographique, établie au moyen d'un SIG, est susceptible de mettre en évidence d'éventuels déficits locaux de certains types d'habitats ou l'absence de continuité biologique à plus large échelle, et de permettre ainsi de hiérarchiser les priorités d'interventions (préservation ou restauration).

Parallèlement, l'architecture d'un modèle individu-centré couplé à un modèle agrégé est définie et en cours d'élaboration (modèle de déplacement et de démographie). Le modèle biologique retenu est le barbeau fluviatile, comme représentant du groupe fonctionnel des espèces rhéophiles, que l'on fait évoluer dans le paysage aquatique des couches SIG préalablement définies, afin d'explorer et analyser les patterns aux échelles locales et globales.

L'objectif est bien d'aboutir à l'élaboration d'un simulateur, sorte de « laboratoire virtuel », permettant d'explorer qualitativement les évolutions possibles du système, et de tester sa réaction à des scénarios prospectifs de gestion des milieux (protection, destruction, restauration).

Références

- Baras E. (1992) - A study of time and space utilisation strategies in the common barbel *Barbus barbus* (L.). *Cahiers d'éthologie*, 12 (2-3), 125-442.
- Bian, L. (2000). Object-oriented representation for modelling mobile objects in an aquatic environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 603–623.
- Bian, L. (2003). The representation of the environment in the context of individual-based modeling. *Ecological Modelling*, 159(2-3), 279– 296.
- Grimm, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology : What have we learned and what could we learn in the future ? *Ecological Modelling*, 115(2-3) :129–148.
- Grimm, V., Frank, K., Jeltsch, F., Brandl, R., Uchmanski, J., and Wissel, C. (1996). Pattern-oriented modelling in population ecology. *The Science of The Total Environment*, 183(1-2) :151–166.
- Hein, S., Pfenning, B., Hovestadt, T., and Poethke, H. J. (2004). Patch density, movement pattern, and realised dispersal distances in a patch-matrix landscape—a simulation study. *Ecological Modelling*, 174(4) :411–420. 1
- Le Pichon C., Gorges G., Tales E., Faure T., Goreaud F., Gaillard S., Richard D., Bonté P., Lefèvre I. & Bombléd B. (2004) - *Relation entre la structure spatiale du paysage aquatique et le peuplement piscicole*. Rapport d'activité 2003. Axe Thématique 3 : Écologie du continuum fluvial et du paysage aquatique, PIREN-Seine, janvier 2004, Paris, 27 p. + annexes.
- Lucas M.C. & Batley E. (1996) - Seasonal movements and behaviour of adult barbel *Barbus barbus*, a riverine cyprinid fish: Implications for river management. *J Appl Ecol*, 33 (6), 1345-1358.
- Lucas, M. C. and Baras, E. (2001). *Migration of Freshwater Fishes*. Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Pavlov D.S. (1989) - Structures assisting the migrations of non-salmonid fish : USSR. FAO, Rome, *FAO Fisheries Technical Paper*, 308, 97 p.
- Philippart J.C. (1977) - Contribution à l'hydrobiologie de l'Ourthe. Dynamique des populations et production de quatre espèces de poissons cyprinidae: *Barbus barbus* (L.), *Leuciscus cephalus* (L.), *Chondrostoma nasus* (L.) et *Leuciscus leuciscus* (L.). *Docteur en sciences Faculté des sciences*, 217 p.
- Wolter C. & Arlinghaus R. (2003) - Navigation impacts on freshwater fish assemblages: The ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13 (1), 63-89.