

# Relation entre la structure spatiale du paysage aquatique et le peuplement piscicole

Céline Le Pichon<sup>1</sup>, Guillaume Gorges<sup>1</sup>, Evelyne Tales<sup>1</sup>, Thierry Faure<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cemagref HBAN, Parc de Tourvoie 92163 Antony celine.lepichon@cemagref.fr

<sup>2</sup> Cemagref LISC, 63172 Aubière thierry.faure@cemagref.fr

## Sommaire

Relation entre la structure du paysage aquatique et les peuplements de poissons .....	1
1. Représentation des habitats aquatiques de la plaine de la Bassée .....	1
1.1. Cartographie de la mosaïque des milieux aquatiques.....	1
1.2. Cartographie des habitats ressources des cyprinidés rhéophiles étudiés : <i>Barbus barbus</i> et <i>Chondrostoma nasus</i> .....	4
1.3. Etude de la composition et la configuration des habitats ressources.....	4
2. Modélisation du cycle de vie du barbeau fluviatile.....	7
2.1. Description de l'approche.....	7
2.2. Description du modèle du barbeau fluviatile.....	9
2.3. Résultats .....	11
3. Conclusion et perspectives .....	12
4. Bibliographie .....	13

## 1. Représentation des habitats aquatiques de la plaine de la Bassée

### 1.1. Cartographie de la mosaïque des milieux aquatiques

#### 1.1.1 Réalisation des couches d'information du bief naturel

##### *Variabilité hydrologique*

La chronique des débits enregistrée à la station de jaugeage de Pont-sur-Seine (H1720010) a été analysée pour la période 1979-2004, les résultats des quantiles mensuels sont présentés dans la Figure 1. Cette station est située au milieu du bief naturel.

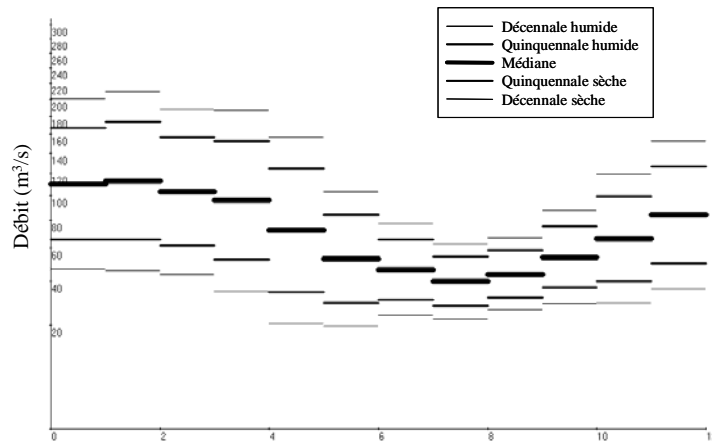


Figure 1 - Etude de la chronique des débits à Pont-sur-Seine (1979-2004) à l'aide du logiciel SynGen (Etienne Leblois, Cemagref Lyon). Quantiles mensuels de décennal sec à décennal humide.

La période de reproduction de la majorité des espèces présentes sur le secteur correspond aux mois de mars à juillet. Pour cette période clé du cycle de vie, la moyenne des médianes mensuelles est de 74 m<sup>3</sup>/s, celle des quinquennales sèches mensuelles est de 42 m<sup>3</sup>/s et celle des quinquennales humides mensuelles de 117 m<sup>3</sup>/s. L'analyse des débits classés montre que pour environ 40% du temps de la chronique le débit 74 m<sup>3</sup>/s est dépassé, 72% du temps pour le débit 42 m<sup>3</sup>/s et 20% pour le débit 117 m<sup>3</sup>/s. Cette analyse nous permet de déterminer quels sont les débits pertinents pour réaliser les cartes d'habitats pour les poissons.

En fonction de ces débits caractéristiques de la chronique et des contraintes techniques on a pu réaliser deux cartes du bief naturel à 70 m<sup>3</sup>/s et 40 m<sup>3</sup>/s.

#### *Couches d'information au débit « 70 m<sup>3</sup>/s »*

Les variables physiques et les milieux aquatiques connectés au chenal principal ont été localisés à l'aide d'un équipement GPS différentiel qui atteint des précisions inférieures au mètre (DGPS, Trimble ProXRS). Afin d'obtenir une bonne précision pour les coordonnées des points géoréférencés on a contraint la prise de position à l'existence d'au moins 4 satellites, d'un PDOP > 6 (Position Dilution of Precision) et d'un rapport signal sur bruit SNR < 6. Les données de positionnement sont corrigées en temps réel grâce aux corrections différentielles reçues par radio en provenance du satellite OMNISTAR.

Pendant les 6 jours de cartographie en juin 2001 l'amplitude de débit était de 65-73 m<sup>3</sup>/s. On a localisé et délimité :

- Les limites du chenal;
- les milieux annexes connectés au chenal ;
- les milieux de moins d'un mètre d'eau, repérés au préalable à l'aide d'une perche graduée, ainsi que leurs substrats principaux;
- le type de berge (plage pour une pente < 45° et abrupte pour une pente > 45°) et leur substrat ;
- la présence d'îles, de ripisylve et de débris ligneux grossiers ;
- la vitesse du courant prise à 20cm de la surface à l'aide d'un courantomètre.

L'ensemble des entités initiales utilisées: points, lignes ou polygones localisées par le GPS sont exportées vers le système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel Pathfinder Office®. L'ensemble des cartographies et des traitements de l'information spatialisée est réalisé à l'aide des logiciels SIG ArcInfo® et Arcview®. Les cartes sont géoréférencées en coordonnées Lambert I, Nord de la France.

### *Couches d'information au débit « 40 m<sup>3</sup>/s »*

On a fait l'hypothèse que la variation de débit ne modifiait que les contours des milieux en eau, les couches d'information concernant les paramètres hauteur d'eau, vitesses de courant, substrat, ripisylve et embâcles sont les mêmes que pour le débit 70m<sup>3</sup>/s. Les contours de la rivière ont été numérisés par photo-interprétation de la zone en eau sur les prises de vue aérienne issues de la mission FD10/250 du 29 juin 2000 (BD Ortho® couleur de l'IGN), à l'aide du SIG, le débit étant ce jour là proche de 40m<sup>3</sup>/s à la station de jaugeage de Pont-sur-Seine. Ces images sont corrigées des déformations dues à la prise de vue et au relief pour fournir une orthophotographie qui est géoréférencée ; leur précision est de 50 cm. Les milieux annexes et les milieux de moins de 1m de profondeur ont été modifiés, supprimés ou créés en fonction de ce qui était visible sur ces mêmes prises de vue aérienne et à l'aide de mesures et de relevés réalisés pendant l'été 1996 où le débit est resté stable autour de 35m<sup>3</sup>/s. La couche concernant la vitesse du courant est faite comme la précédente en utilisant des mesures ponctuelles de vitesse effectuées lors d'une campagne de mesures à l'automne 2004 au débit 40m<sup>3</sup>/s.

#### **1.1.2 Cartes finales de la mosaïque des milieux**

La mosaïque des milieux est ainsi constituée de nombreux polygones qui possèdent chacun une information de vitesse en 5 classes, de hauteur d'eau en 2 classes, de substrat pour la classe de hauteur d'eau < 1m, de ripisylve et d'embâcle. La figure 2 représente un détail de cette mosaïque des milieux où chaque type est une combinaison entre les classes de vitesse et les classes de hauteur d'eau-ripisylve-embâcle (le substrat n'a pas été représenté par souci de clarté).

Type de milieu

- V1 P Ri+ Eo
- V1 P Rio Eo
- V2 P Ri+ E+
- V2 P Ri+ Eo
- V2 P Rio E+
- V2 P Rio Eo
- V2 R Ri+ E+
- V2 R Ri+ Eo
- V2 R Rio E+
- V2 R Rio Eo
- V3 P Ri+ E+
- V3 P Ri+ Eo
- V3 P Rio E+
- V3 P Rio Eo
- V3 R Ri+ E+
- V3 R Ri+ Eo
- V3 R Rio E+
- V3 R Rio Eo
- V4 P Ri+ E+
- V4 P Ri+ Eo
- V4 P Rio E+
- V4 P Rio Eo
- V4 R Ri+ E+
- V4 R Ri+ Eo
- V4 R Rio E+
- V4 R Rio Eo
- V5 P Ri+ Eo
- V5 P Rio Eo
- V5 R Ri+ Eo
- V5 R Rio E+
- V5 R Rio Eo



Figure 2 – Détail de la mosaïque des milieux pour le bief naturel à 70m<sup>3</sup>/s.

## 1.2. Cartographie des habitats ressources des cyprinidés rhéophiles étudiés : *Barbus barbuis* et *Chondrostoma nasus*

Les cartes de chaque habitat ressource pour un débit donné sont obtenues par croisement hiérarchique des différentes couches utiles. A la différence de la mosaïque des milieux, on a préalablement sélectionné les éléments de classes et de substrats favorables comme indiqués au

Tableau 1. Les aires obtenues sont assemblées pour former une couche finale représentant toutes les taches de l'habitat ressource considéré. On construit ainsi trois cartes, représentant les taches des différents habitats, dans lesquels se déroulent l'alimentation, le repos et la reproduction.

Tableau 1 – Couches d'information utilisées pour réaliser les cartes d'habitat ressources des barbeaux et hotus et classes retenues pour chaque variable ou entité.

Couches SIG en format vecteur	Repos	Alimentation	Frayère
Vitesse	$V_1, V_2, V_3$	$V_3, V_4$	$V_3, V_4, V_5$
Plage		sable, gravier, sable/gravier	gravier, sable/gravier
Plat	bloc	sable, gravier, sable/gravier, bloc, sable/gravier	gravier, sable/gravier
Berge abrupte	bloc		gravier, sable/gravier
Embâcle	toute		
Ripisylve	toute		
Annexe hydraulique naturelle	toute		

$V_1$ : pas de vitesse de courant;

$V_2$ :  $V < 0,2$  m/s;

$V_3$ :  $0,2$  m/s  $< V < 0,5$  m/s;

$V_4$ :  $0,5$  m/s  $< V < 1$  m/s;

$V_5$ :  $V > 1$  m/s

## 1.3. Etude de la composition et la configuration des habitats ressources

### 1.3.1 Description des métriques et des méthodes d'analyse utilisées

La composition, la configuration et la complémentation des habitats ressources ont été évaluées à l'aide de deux types de méthodes. Des indices (ou métriques) ont été calculés pour fournir des mesures quantitatives à l'échelle des taches d'habitats et de chaque habitat ressource. Des méthodes d'analyses sur carte entière ont été aussi développées pour délimiter l'habitat fonctionnel. Le diagramme général des méthodes et des outils utilisés est proposé dans la figure 3.

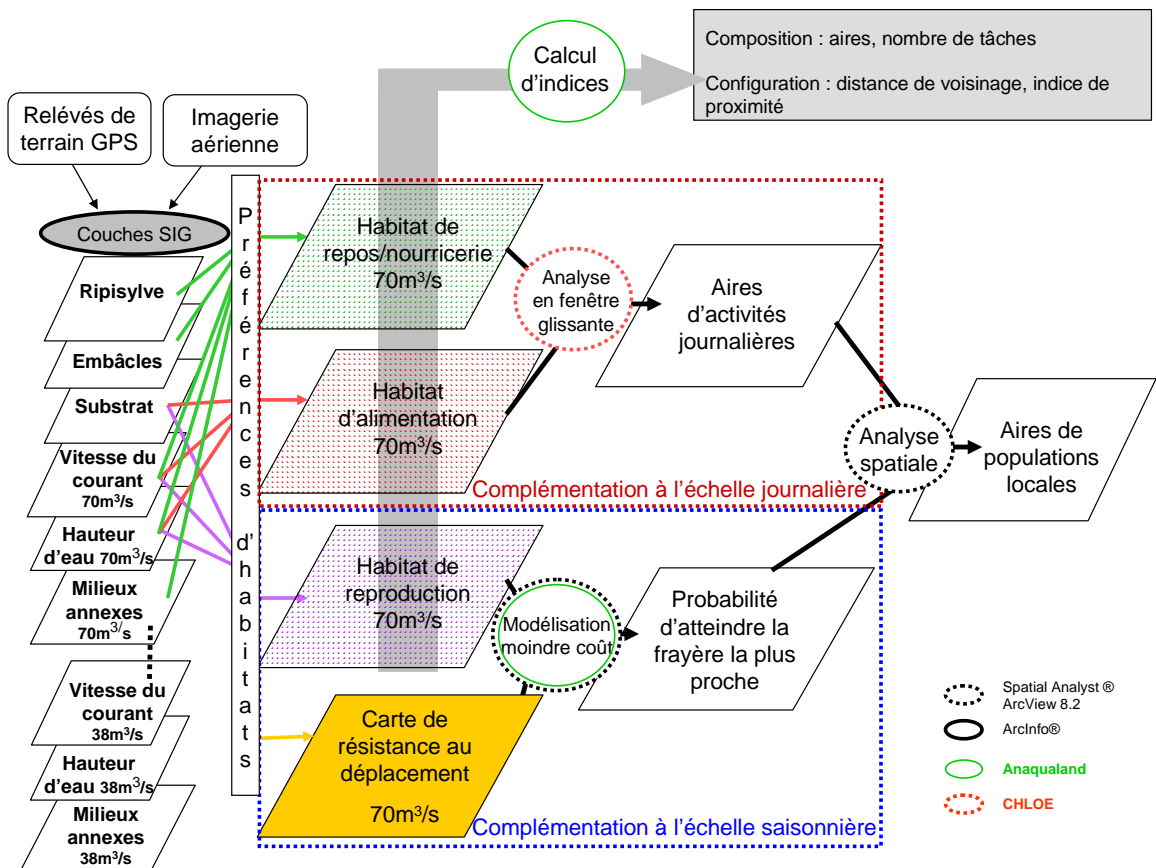


Figure 3 : Diagramme général des méthodes et des outils utilisés pour étudier la composition, la configuration et la complémentation multi-échelles des habitats des poissons d'eaux courantes.

### 1.3.2 Structure du paysage sub-aquatique et des habitats ressources

La quantité et la structure spatiale des habitats ressources dans le bief naturel varient avec le débit. Les surfaces totales d'habitats d'alimentation et de frayères diminuent lorsque le débit augmente de 38 m<sup>3</sup>/s à 70m<sup>3</sup>/s. Dans ce dernier cas c'est plus le nombre de taches qui diminue que leur surface moyenne (Tableau 2). En effet à ce débit, certaines taches ont disparu à cause du profil des berges qui devient abrupt lorsque le niveau d'eau monte. Cette diminution du nombre de taches avec le débit est encore plus prononcée pour l'habitat de reproduction. Cet habitat est alors le plus fragmenté avec une distance médiane de voisinage entre taches adjacentes qui augmente significativement et un indice de proximité moyen qui atteint une valeur proche de celle observée pour le même habitat ressource dans le bief aménagé. Que ce soit dans le bief naturel ou aménagé, chaque habitat ressource représente moins de 20% de la surface totale en eau, ce qui en milieu terrestre semble être un seuil en dessous duquel la configuration de l'habitat joue un rôle dans la taille des populations et leur persistance (Fahrig, 1998).

Dans le bief aménagé, la faible représentation des milieux peu profonds avec courant a un impact direct sur les habitats d'alimentation et de frayère qui ne représentent plus que 2,4 à 2,6% de la surface totale du chenal contre 6,6 à 17,5% dans le bief naturel (tableau 2). Ces faibles surfaces totales sont liées à la fois à un nombre faible de taches et à une surface moyenne faible. A l'inverse l'habitat de repos est représenté par de nombreuses taches et bien qu'elles soient de petite taille, l'indice de proximité moyen atteint une valeur forte.

Tableau 2 – Métriques de composition et de configuration calculées pour les milieux et les habitats ressources des barbeaux et hotus dans le bief naturel aux deux débits étudiés. Dans la même colonne, les habitats ressources partageant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différents au seuil de 5% (Test de rang de Wilcoxon).

Bief et débit	Milieux et habitats ressources	Surface totale (m <sup>2</sup> )	Surface totale <sup>1</sup> (% aire du chenal) <sup>2</sup> (% aire en eau)	Aire médiane (m <sup>2</sup> )	Nombre de taches	Distance médiane de voisinage (m)
Bief naturel 38 m <sup>3</sup> /s	Chenal	1 295 360	95,7 <sup>2</sup>	-	-	-
	Milieux annexes	58 290	4,3 <sup>2</sup>	795	29	-
	Repos	140 616	10,3 <sup>2</sup>	170 <sup>b</sup>	187	31 <sup>d</sup>
	Alimentation	226 620	17,5 <sup>1</sup>	1 023 <sup>a</sup>	85	74 <sup>c</sup>
	Reproduction	149 159	11,5 <sup>1</sup>	994 <sup>a</sup>	50	98 <sup>c</sup>
Bief naturel 70 m <sup>3</sup> /s	Chenal	1 296 260	88,5 <sup>2</sup>	-	-	-
	Milieux annexes	168 347	11,5 <sup>2</sup>	890	66	-
	Repos	204 022	14,0 <sup>2</sup>	176 <sup>b</sup>	193	37 <sup>d</sup>
	Alimentation	138 846	10,7 <sup>1</sup>	1 114 <sup>a</sup>	58	151 <sup>b</sup>
	Reproduction	85 416	6,6 <sup>1</sup>	1 490 <sup>a</sup>	24	371 <sup>a</sup>

### 1.3.3 Complémentation à l'échelle journalière

Il y a complémentation entre deux types d'habitat quand ils ne peuvent pas se substituer l'un l'autre. A l'échelle journalière, les poissons ont besoin d'habitats pour s'alimenter et se reposer. Les méthodes proposées pour évaluer la complémentation et appliquées aux habitats d'alimentation et de repos apportent des informations complémentaires.

L'indice de proximité aux habitats de repos est une estimation de la complémentation à l'échelle de la tache d'habitat d'alimentation. Cet indice est variable selon la tâche d'habitat d'alimentation et la représentation longitudinale de ses valeurs permet d'identifier les taches d'alimentation qui sont isolées des taches de repos. La représentation « en miroir » des surfaces des taches d'alimentation et de la valeur de l'indice de proximité aux taches de repos permet de visualiser la qualité des taches d'habitats d'alimentation à la fois en terme de surface disponible et de complémentation avec l'habitat de repos. Ainsi dans le bief naturel à 70m<sup>3</sup>/s, des surfaces d'alimentation importantes sont présentes dans la partie aval du bief alors que les indices de proximité aux habitats de repos sont plus élevés dans la partie amont du bief. A 38m<sup>3</sup>/s dans le bief naturel, c'est dans sa partie aval que les indices sont le plus élevés. En effet, les habitats de repos de grande taille (milieux annexes connectés au chenal) sont localisés dans cette partie du bief.

Les cartes de complémentation apportent une visualisation à l'échelle du bief dans son ensemble et les aires obtenues représentent un niveau supérieur de celui des taches d'habitats ressources : celui des aires d'activités journalières. Le débit influence la composition et la configuration des aires d'activités journalières. Lorsqu'il augmente de 38 m<sup>3</sup>/s à 70 m<sup>3</sup>/s le nombre de ces aires et leur surface totale diminuent et leur localisation change. Ce résultat indique qu'il faut être prudent lorsqu'on compare des données d'échantillonnage de poissons à différentes saisons ou débits car non seulement les habitats ressources disponibles ainsi que les aires d'activités journalières varient

quantitativement mais leur localisation peut changer impliquant des mouvements de repositionnement des poissons dans les secteurs étudiés.

## 2. Modélisation du cycle de vie du barbeau fluviatile

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 d'habitats 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.

### 2.1. Description de l'approche

La modélisation d'écosystèmes permet de construire des outils d'études et de prédiction pour un système réel. La modélisation individu-centrée consiste à représenter explicitement les caractéristiques et comportements propres à chaque individu du système. Cette particularité permet de simplifier la phase de construction du modèle à partir des connaissances du système.

Dans notre étude, nous proposons un cadre logiciel pour faciliter la phase de construction du modèle informatique, en auscultant toutes les parties nécessaires à cette construction mais qui ne feraient pas partie du modèle en lui-même.

#### 2.1.1 Présentation du cadriciel SimAquaLife

Le projet SimAquaLife consiste à offrir aux modélisateurs de la dynamique spatiale des poissons des eaux courantes un cadriciel<sup>1</sup> leur permettant de se concentrer sur la dynamique elle-même en profitant d'outils génériques prêts à l'emploi. Les modèles ciblés sont ceux qui représentent un système composé d'organismes aquatiques vivant dans un cours d'eau. La position de ces organismes ainsi que leurs déplacements sont explicitement spatialisés dans l'environnement.

- Le cadriciel est articulé autour d'un composant central, appelé par la suite **noyau**, qui est le métamodèle du domaine des modèles applicatifs ciblés que nous proposons. Ce composant est appelé noyau, du fait qu'il est complètement autonome et qu'il n'a aucune dépendance vis-à-vis d'autres bibliothèques. Un métamodèle est l'expression des concepts et relations communs à l'ensemble des modèles d'un domaine d'application (Estublier *et al.*, 2005). Dans notre cas, il représente les concepts majeurs du domaine ciblé, et permet de fixer le cadre de modélisation en spécifiant les associations entre instances du modèle et les mécanismes d'exécution des processus. Le noyau est ainsi le composant logiciel équivalent au métamodèle. Les autres composants du cadriciel s'articulent autour du noyau (comme illustré sur la figure 4), et permettent de manipuler les modèles applicatifs dérivés du métamodèle.
- Le composant **architecte de modèle** (figure 4) permet d'assembler et de paramétrer les modules dérivés du noyau pour produire un modèle applicatif.
- Le composant **pilote** a pour rôle d'exécuter et de contrôler les simulations, et des extensions permettent d'enrichir ses fonctionnalités. Le pilote possède deux modes d'exécution. Le premier, permet d'initialiser la simulation avec un modèle et un jeu de paramètres à partir de fichiers fournis en entrée. Le second, pourvu d'une interface graphique, permet de manipuler le modèle durant la simulation.

---

<sup>1</sup> Cadriciel : Traduction du terme *software framework*, issu de la contraction de la traduction littérale "cadre logiciel".

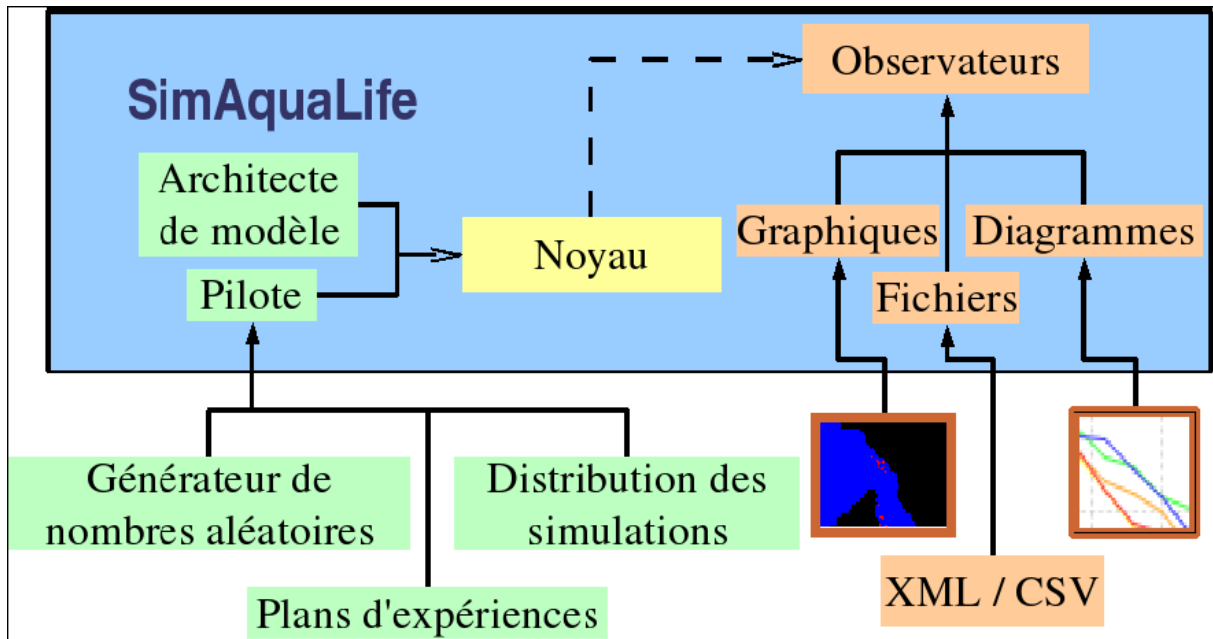


Figure 4 – Diagramme de composants du cadre.

### 2.1.2 Les concepts du métamodèle

Dans la suite, les concepts du métamodèle sont expliqués afin de mettre en évidence ce qui est à la charge du modélisateur, et ce que propose le cadre de modélisation. Ces concepts, ainsi que ces relations sont représentés sur le diagramme UML de la figure 5.

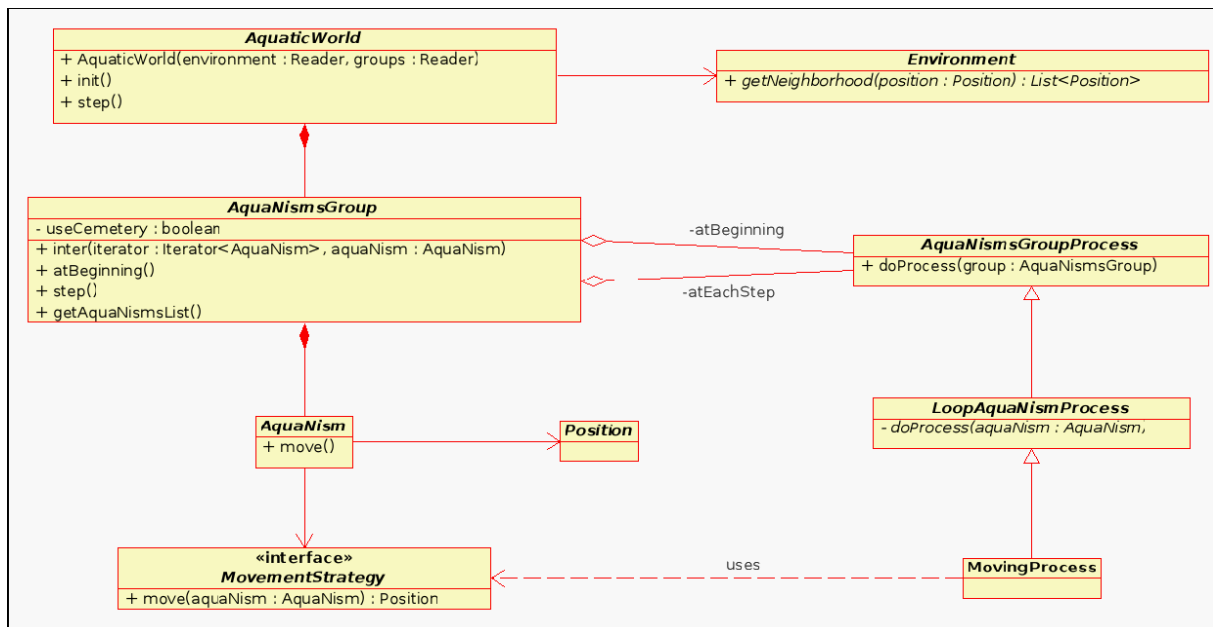


Figure 5 – Diagramme de classes UML du métamodèle.

- La **Position** permet de référencer spatialement les individus dans l'espace
- L'**Environnement** correspond à la structure de donnée choisie par le modélisateur, elle peut se décliner sous la forme de grille régulière en deux dimensions, de réseau hydrographique. La



contrainte imposée à ce concept est de pouvoir obtenir le voisinage d'une position. De ce fait, la modélisation de l'environnement est dépendante du modèle de positionnement choisi.

- Un *Aquanism* est un organisme aquatique évoluant dans l'*Environnement*, référencé par sa position.
- Les *Processus* qui permettent de décrire la dynamique d'un modèle applicatif utilisant SimAquaLife, peuvent être soit individuels soit collectifs. Un processus sera individuel s'il ne concerne qu'un seul individu à la fois, sinon il sera appelé collectif. Ainsi, le déplacement ou la croissance d'un individu seront des processus individuels, tandis que le recrutement ou le prélèvement seront collectifs. Ces processus sont à définir par le modélisateur, en relation avec le référentiel spatial et les classes d'individus utilisées.

## 2.2. Description du modèle du barbeau fluviatile

Le modèle biologique retenu est donc le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), choisi 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 d'analyser les patterns spatiaux aux échelles locales et globales.

Les différents concepts 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).

Les variations au cours du temps des paramètres hydrologiques (hauteur d'eau, vitesse du courant) ne sont pas prises en compte. A défaut d'utiliser un modèle hydrologique ces variations pourront être prises en compte, dans l'avenir, en utilisant des cartes à plusieurs débits.

### 2.2.1 Description des habitats

Nous avons utilisé trois types d'habitat fonctionnel : repos, alimentation et reproduction. Nous utilisons les cartes de préférences d'habitats déterminées lors des travaux précédents (Le Pichon et al., 2004, 2005) à partir des données physiques cartographiées de la rivière.

### 2.2.2 Représentation spatiale

Les modèles individus centrés sont souvent spatialement explicites, c'est-à-dire que les individus sont associés à une position dans un espace géométrique. Un modèle non spatialement explicite ne possède pas d'information de localisation géographique de ses individus. Deux processus entrent en compte dans la représentation spatiale d'un système, la représentation du terrain, et le positionnement des individus (Bian, 2003). Ces deux représentations sont dépendantes, et les contraintes de modélisation nécessitant de choisir une représentation spatiale particulière ne sont pas prioritairement issues d'un de ces deux processus. La représentation spatiale peut être basée soit sur une discrétisation uniforme de l'espace qui est alors considérée comme un ensemble d'unités spatiales homogènes, soit sur une description complexe de l'environnement. D'après Hanski (1998), une troisième approche consiste à trouver un équilibre entre les deux premières, en utilisant la théorie des métapopulations en écologie.

L'année dernière nous avons utilisé une discrétisation uniforme de l'espace avec des pixels de résolution 1 m x 1 m, ceci avait l'inconvénient d'être très coûteux en terme de taille mémoire et en terme de temps de calcul pour représenter des zones d'extension spatiale de plusieurs km avec plusieurs milliers d'individus.

Nous avons utilisé une représentation spatiale explicite de type vectoriel :

- L'environnement est représenté par des polygones qui possèdent des propriétés homogènes (type d'habitats, hauteur d'eau, vitesse du courant, ...)
- Les poissons ont une localisation explicite en (x,y), leur déplacement va être fonction des milieux traversés.

### 2.2.3 Les processus modélisés

#### *Déplacement*

Le processus de déplacement est modélisé en utilisant un patron bi modal (avec une activité aurorale et crépusculaire) et un parcours moyen constant au cours de l'année. Néanmoins Baras (1992) a mis en évidence une thermorégulation spatiale et temporelle chez le barbeau qui adapte l'utilisation du temps et de l'espace en fonction de cette variable qui conditionne son métabolisme.

Pour la recherche des zones cibles, les poissons utilisent deux stratégies :

- une recherche guidée, en optimisant localement son parcours. Les poissons vont chercher à passer par les zones qui lui sont les plus favorables en terme de coût énergétique. Nous utilisons ici les mêmes approches en utilisant localement une résistance à l'avancement des poissons dans la rivière (qui est fonction du milieu physique : présence de granulats, ..., mais aussi de l'hydrologie locale : hauteur d'eau, vitesse du courant ) (Le Pichon et al., 2006). Les valeurs des résistances utilisées sont celles établies précédemment (Le Pichon et al., 2005).
- Une mémoire : les poissons gardent en mémoire pendant une certaine période les zones sur lesquelles ils sont allés soit pour l'alimentation soit pour le repos.

Chaque poisson en fonction de ses caractéristiques et/ou de son environnement va privilégier une des 2 approches.

#### *Croissance*

Le processus de croissance est indépendant du sexe pendant les trois premières années (taille de l'ordre de 12 à 13 cm). Ensuite il y a une forte différence entre les femelles et les mâles, qui atteignent en moyenne une taille à l'âge de 10 ans de respectivement 40 cm et 27 cm.

#### *Reproduction*

Nous nous fondons sur les résultats de Philippart (1979) et Baras (1992) obtenus par radio pistage sur des populations de Cyprinidés de l'Ourthe.

- La reproduction a lieu durant la période Mai- Juin : durant cette période un barbeau adulte va rechercher les sites de reproduction.
- Les mâles peuvent se reproduire lorsqu'ils atteignent une taille de 12 cm (entre 2 et 3 ans) et les femelles plus tardivement lorsqu'elles atteignent 35 cm (entre 8 et 10 ans)
- Le nombre d'ovules pondus est fonction du poids de la femelle.
- Le paramètre température n'a pas été pris en compte car les données de variation temporelle de température n'étaient pas disponibles. Baras (1992) a montré que la température a un rôle inhibiteur de reproduction. En dessous d'un seuil (autour de 13.5°C il n'y a plus de reproduction).

#### *Développement et recrutement*

Les œufs une fois fécondés ont une incubation de 8 jours, puis passage au mode pélagique 16 à 19 jours après l'éclosion. La mortalité élevée est modélisée par une exponentielle décroissante :

$$t = k \exp(-x) \quad x > 0 \text{ et } k > 0,$$

avec : t : taux de mortalité, x : temps et k : constante du modèle.

#### *Mortalité*

Pour modéliser la mortalité des poissons après la première année, nous avons utilisé une fonction de distribution de Weibull, car elle permet en particulier une décroissance plus importante du taux de mortalité pour les plus jeunes individus.

$$t = \gamma x^{\gamma-1} \exp(-x^\gamma) \quad x > 0 \text{ et } \gamma > 0$$

avec t : taux de mortalité, x : âge et  $\gamma$  : paramètre du modèle.

## 2.3. Résultats

### 2.3.1 Présentation des rendus

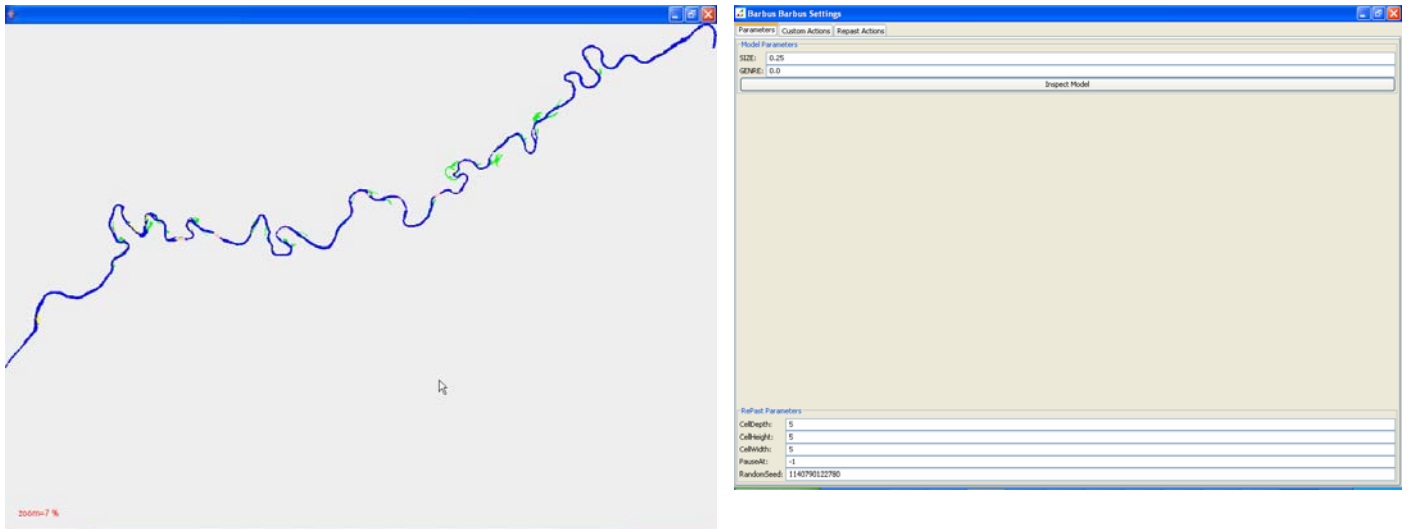


Figure 6 : Exemples de fenêtres du logiciel.

La figure 6 présente le type de rendus fournis par le modèle, la partie gauche représente une carte navigable du bief sub naturel (extension :25 km), avec la représentation des habitats et des poissons. La partie droite présente un des contrôles du simulateur, pour ajuster les paramètres du modèle.

### 2.3.2 Mise en œuvre des déplacements

Il est possible de figurer la localisation des barbeaux pendant une phase d'alimentation (figure 7 :zone rose). Sur cette carte on voit la différence entre les secteurs avec une forte densité de population (A), où les zones constituant l'aire de vie (alimentation et repos) sont proches, et les secteurs avec une densité plus faible (B), où les zones d'alimentation et de repos sont plus éloignées.

Il semble bien que l'aire de vie soit un des facteurs limitant pour avoir une bonne répartition spatiale des poissons dans la rivière.

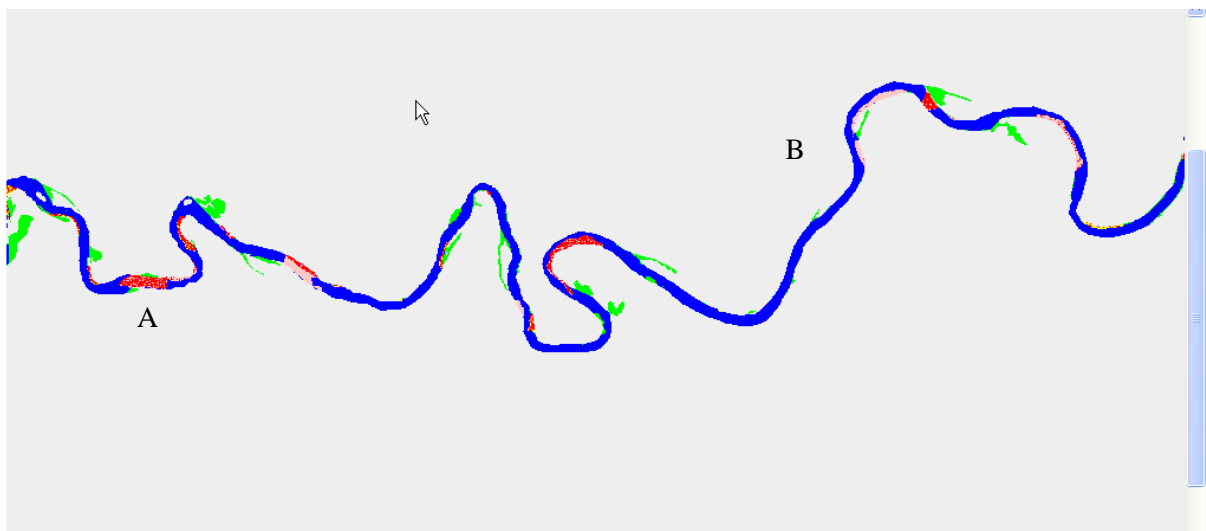


Figure 7 : Localisation des barbeaux pendant une phase d'alimentation (zone de couleur rose).

### 2.3.3 Résultats préliminaires globaux

La figure 8 présente les résultats de la distribution en taille des barbeaux modélisée au cours de leur cycle de vie. Sur cette distribution il apparaît clairement les différents recrutements de la population. La distribution avec une tendance annuelle assez marquée est proche de celle observée par Baras (1992). Néanmoins la décroissance du nombre des barbeaux avec l'âge est très marquée dans les simulations et est liée au processus de mortalité. Dans les observations, cette tendance est beaucoup moins marquée, car il apparaît un effet assez important lié à la variabilité climatique (effet de la température et des précipitations).

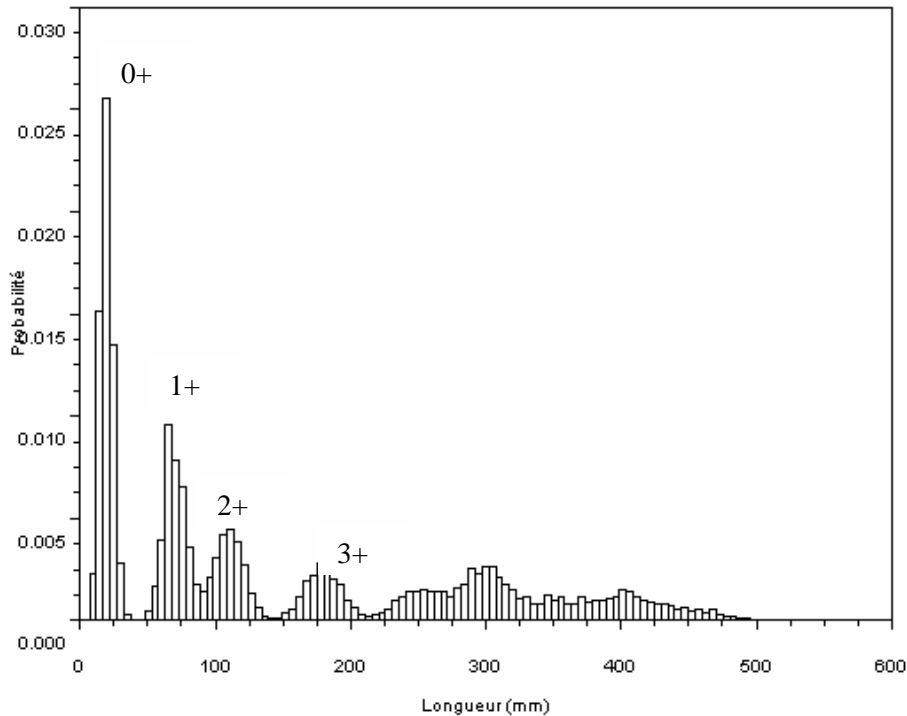


Figure 8 : Densité de probabilité des tailles des barbeaux.

## 3. Conclusion et perspectives

Les variations de débit influencent la quantité des habitats ressources. Notamment, les surfaces totales d'habitats d'alimentation et de frayères diminuent lorsque le débit augmente de  $38 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le nombre de taches d'habitat diminue également avec l'augmentation du débit, et de manière plus prononcée pour l'habitat de reproduction. La variabilité hydrologique influence par ailleurs la composition et la configuration des aires d'activités journalières.

Les bases du modèle pour le barbeau sont désormais en place. Cet outil est maintenant dans sa phase de validation. La poursuite de cette étude va nécessiter :

- De réaliser une analyse exploratoire du modèle, en utilisant le logiciel simExplorer (Faure et al., 2006)
- De valider les résultats issus de la modélisation avec des données de pêches et avec les indices issus de l'analyse du paysage aquatique (Le Pichon et al., 2006). Par ailleurs, un modèle agrégé de type Matrice de Leslie (Charles, 2004) est en cours de développement, qui permettra de valider les comportements globaux observés dans le modèle individu-centré.

Ses performances pourront être améliorées en intégrant des paramètres qui sont importants dans les processus biologiques tels que la température. Par ailleurs, pour que cet outil soit directement opérationnel, il faudrait développer une interface plus conviviale pour en faire un démonstrateur qui

permette de tester des scénarios prospectifs de gestion des milieux (protection, destruction, restauration).

#### 4. Bibliographie

- 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. (2003) The Representation of the Environment in the Context of Individual-based Modeling, Ecological Modelling, 159 (2-3):279-296.
- Charles-Bajard S.(2004) Les modèles matriciels de type Leslie : Une approche couplée Mathématiques et Statistiques. HDR, Université Claude Bernard - LYON I.
- Dumoulin N., Lambert P., Faure T., Rochard E. (2005). "Impact of river network topology on European eel population dynamics estimated with a individual-based model", in Fish and Diadromy in Europe International symposium 2005 (FDE2005). Diadfish (Ed.). Bordeaux (France).
- Dumoulin N. (2004) Towards a framework for multi-scale models of freshwater fishes, ESMc'2004 (European Simulation and Modelling Conference), Paris
- Fahrig L. (1998) When does fragmentation of breeding habitat affect population survival? Ecological Modelling, 105, 273-92.
- Faure T., Deffuant G. (2006) SimExplorer : un outil générique pour programmer et exécuter des plans d'expériences sur des modèles, Conférence MOSIM 2006, Rabat
- Hanski I. (1998) Metapopulation dynamics, Nature,396 (6706) :41-49.
- Le Pichon, C., Gorges G., Boët P., Baudry J., Goreaud F. and Faure T. (2006) A Spatially Explicit Resource-Based Approach for Managing Stream Fishes in Riverscapes, Environmental Management 37(3) .
- Le Pichon C., Gorges G., Dumoulin N., Faure T., Boët P. (2005) Relations entre paysage hydrologique et peuplements biologiques. Rôle des zones humides, Rapport d'activité 2004 Piren Seine.
- 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. & Baras E. (2001) Migration of freshwater fishes. Blackwell Publishing: 420 pp.
- 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.). Thèse de doctorat, 217 p.