

# Relation entre la structure du paysage et le peuplement piscicole

Céline Le Pichon<sup>1</sup>, Guillaume Gorges<sup>1</sup>, François Goreaud<sup>2</sup>, Thierry Faure<sup>2</sup>, Stéphan Gaillard<sup>3</sup> et Jacques Baudry<sup>4</sup>

1- Cemagref, Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques

2- Cemagref, Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes

3- Université de Nantes, LETG-UMR 6554-CNRS

4- INRA, SAD Armorique, Rennes

Relation entre la structure du paysage et le peuplement piscicole .....	1
1. Caractérisation et fonctionnement hydro – géomorphologique du lit et de la plaine fluviale.....	2
1.1. Dynamique actuelle de l'hydrosystème Bassée : fonctionnement du lit mineur et structure hydrogéomorphologique de la plaine fluviale.....	2
1.2. Inventaires typologiques.....	5
2. Caractérisation de l'organisation spatiale des habitats sub-aquatiques du lit mineur .....	6
2.1. Introduction.....	6
2.2. Définition des indices.....	7
2.3. Implémentation.....	13
2.4. Un exemple virtuel.....	18
Références bibliographiques .....	21

L'ambition est d'enrichir la connaissance actuelle de l'hydrosystème fluvial Seine, par une approche faisant appel à « l'écologie du paysage ». Au sens de cette discipline, le paysage se définit comme « *un niveau d'organisation des systèmes écologiques, supérieur à l'écosystème ; il se caractérise essentiellement par son hétérogénéité et par sa dynamique gouvernée pour partie par les activités humaines* ». Ce niveau est pertinent pour traiter des questions portant sur les conséquences des actions de l'homme sur la biodiversité (Burel & Baudry 1999<sup>1</sup>).

L'originalité de cette approche est de prendre en compte la structure spatiale et sa dynamique comme facteur agissant sur les communautés biologiques. Elle s'inscrit en effet dans une perspective de conservation de la biodiversité terrestre (végétaux, oiseaux...) et aquatique (poissons...), où n'est plus seulement considérée la quantité d'habitats disponibles, mais aussi leur configuration spatiale dans le paysage (Schumaker 1996<sup>2</sup>).

L'analyse prend en compte la genèse et l'évolution du paysage hydrologique, sur le temps long par la géomorphologie. Il est prévu de l'étendre aux périodes historiques par l'aménagement humain.

Aujourd'hui, le projet focalise sur les habitats sub-aquatique du lit mineur et la dynamique des populations piscicoles. Néanmoins, nous envisageons de considérer prochainement l'ensemble de la plaine alluviale, support des habitats fonctionnels pour certains poissons. La caractérisation de l'organisation spatiale des habitats du lit mineur sera ensuite mise en relation avec les types hydro-géomorphologiques présents sur le secteur d'étude.

Une première partie présente notre secteur d'étude et les types hydro-géomorphologiques présents, la seconde partie présente l'approche utilisée pour caractériser l'organisation spatiale des habitats sub-aquatiques du lit mineur.

---

<sup>1</sup> Burel F. & Baudry J., 1999. *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications.*, Tec & Doc, Paris, 359 p.

<sup>2</sup> Schumacker N.H., 1996. Using landscape indice to predict connectivity. *Ecology*, 77, 1210-1225.

# 1. Caractérisation et fonctionnement hydro – géomorphologique du lit et de la plaine fluviale.

De Marcilly – sur – Seine à Montereau, la plaine de la Bassée constitue une des zones humides riveraines les plus importantes du bassin de la Seine. Elle est, à ce titre, classée «Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique » (ZNIEFF).

Dans ce paragraphe deux thèmes sont abordés. Dans un premier temps, la structure et le fonctionnement hydro – géomorphologique du lit et de la plaine sont précisés. Dans un second temps, des inventaires typologiques produits sur les deux secteurs sont présentés.

## 1.1. Dynamique actuelle de l'hydrosystème Bassée : fonctionnement du lit mineur et structure hydrogéomorphologique de la plaine fluviale.

De Marcilly – sur – Seine à Montereau, le lit et la plaine sont inscrits dans les assises de craie du Crétacé supérieur. Les figures suivantes se rapportent aux deux secteurs étudiés : le secteur dit « naturel » de Conflans à Nogent (fig. 1.1) et le secteur qualifié d'artificiel de Bray à Montereau (fig. 1.2). Ces documents ont été réalisés à partir de la lecture et de l'interprétation des cartes topographiques IGN à 1/25 000<sup>e</sup>, des cartes géologiques BRGM à 1/50 000<sup>e</sup>, des photographies aériennes IGN de 1990, des minutes de la Carte d'Etat Major à 1/40 000<sup>e</sup> de 1840 et de cartes manuscrites datées du XIX<sup>e</sup> siècle (Dzana, 1997). Ces figures montrent :

- l'extension du lit majeur actuel et des systèmes de basses terrasses et montilles qui correspondent à la plaine fluviale développée durant la dernière période froide (*i.e.* chronozone weichsélienne) ;
- la position du lit mineur en 1990 et des anciens tracés datés de 1828, 1858 et 1945 ;
- la distribution des chenaux dans la plaine (annexes hydrauliques, méandres recoupés, noues, fossés et canaux, etc...) ;
- la distribution des aménagements hydrauliques linéaires (digues, levées de terre, remblais) et ponctuels (écluses, buses, ponts).

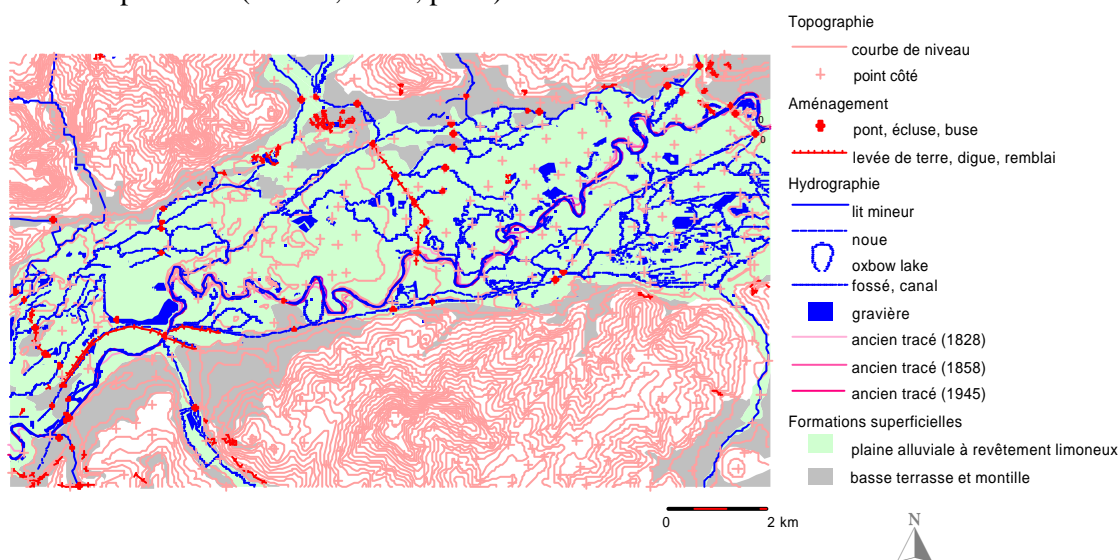


Figure 1.1. Secteur « naturel » de Conflans à Nogent.

Les deux secteurs étudiés s'étendent sur près de 16 et de 20 km linéaire. La largeur moyenne de la plaine est de 3.3 km dans le secteur « naturel » et de 2.2 km dans le secteur artificiel. Les pentes longitudinales sont comprises entre 0.3 et 0.6 ‰. Abstraction faite des aménagements hydrauliques, l'hydrosystème dans les deux secteurs est caractérisé par une forte variabilité hydro – géomorphologique dans les différentes dimensions du système. La succession des faciès hydro – géomorphologiques observée longitudinalement, mais aussi dans le plan horizontal et dans le plan

vertical, contribue à la formation d'un paysage en mosaïque qui confère à ces secteurs une forte originalité. Ceci est dû (1) au poids des héritages géomorphologiques et (2) au balayage de la plaine par un lit à méandres mobiles durant l'Holocène.

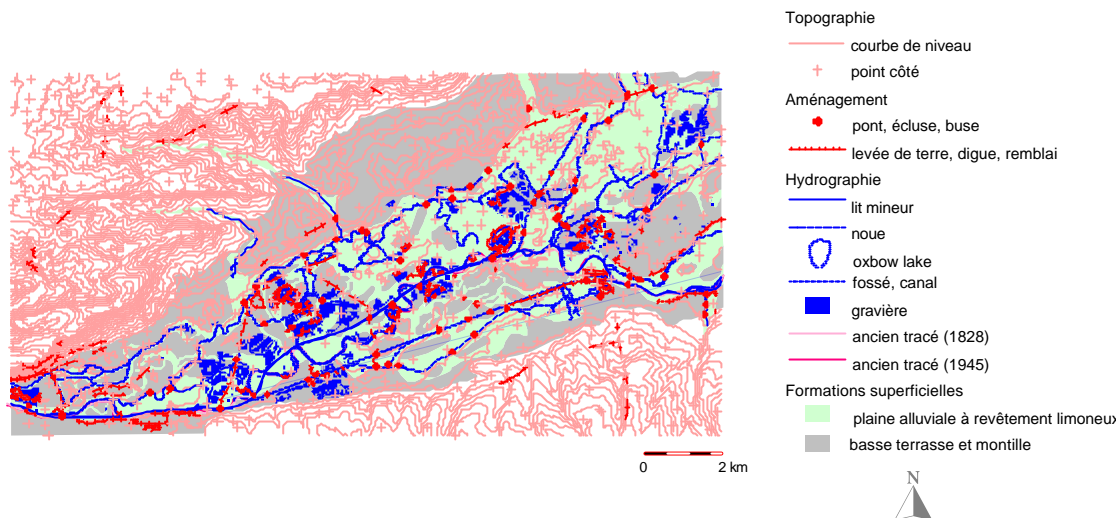


Figure 1.2. Secteur artificiel de Bray à Montereau.

### 1.1.1. Le poids des héritages géomorphologiques dans la structuration hydro – géomorphologique du système.

La figure 1.3 montre une coupe stratigraphique de référence obtenue à Granges (vallée de l'Aube) quelques kilomètres en amont des secteurs étudiés. Associée à des calages chrono – et bio – stratigraphiques, elle fournit une séquence – type du Préboréal jusqu'à l'actuel qui permet (1) de reconstituer les différentes étapes de la mise en place des fonds de vallées à l'Holocène en Champagne et (2) de rendre compte de la structuration hydro – géomorphologique actuelle de ces systèmes.

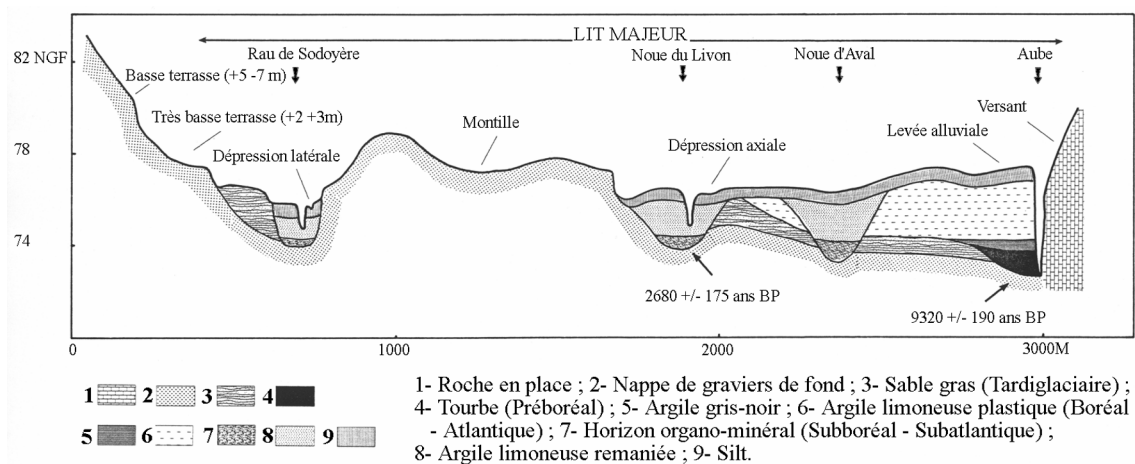


Figure 1.3. Coupe stratigraphique de référence des fonds de vallées (Granges – sur – Aube).

Cette coupe montre que trois cycles érosion – sédimentation consécutifs à des oscillations bioclimatiques se sont succédés du Tardiglaciaire à l'Holocène. Schématiquement :

- le premier cycle est caractérisé par l'incision d'un chenal en tresse dans la nappe de graviers ; situable au Tardiglaciaire, ce cycle est à l'origine du dégagement des basses terrasses et montilles ; il marque une rétraction des systèmes fluviaux conduisant à la formation des lits majeurs actuels ;

- le second cycle couvre la première moitié de l'Holocène ; il est à l'origine de la concentration des écoulements dans un chenal unique (*i.e.* lit mineur actuel) ; latéralement des chenaux secondaires hérités du système en tresse se développent ;
- le troisième cycle (Subboréal – Subatlantique) est marqué par une reprise des écoulements dans les chenaux secondaires puis par une accumulation due à l'érosion agricole ; ces chenaux correspondent aux noues observées actuellement en fonds de vallées.

### 1.1.2. Dynamique du lit à méandres mobiles à l'Holocène.

La métamorphose fluviale enregistrée à l'Holocène est à l'origine de la formation du lit à méandres mobiles observable dans le secteur « naturel ». Malgré une puissance brute faible du cours d'eau ( $\Omega < 250 \text{ W.m}^{-1}$ ), l'instabilité du lit dans le plan horizontal est due aux caractéristiques granulométriques des berges. Le chenal, emboîté dans la nappe de graviers, présente en effet des berges composites avec à la base des sables et graviers et au sommet des argiles limoneuses, ce qui constitue un facteur favorable à la formation de méandres libres (Thorne et Lewin, 1979).

A partir de travaux conduits à différentes échelles de temps et d'espace, la mobilité du lit a été quantifiée et les processus de migration du lit ont été précisés. Les figures 1 et 2 montrent la position du lit à différentes dates (1828, 1858, 1945 et 1990). Dans le secteur naturel, par exemple, les aires balayées apparentes, qui permettent d'appréhender en terme de bilan les processus érosion – dépôt, varient de 50 à plus de 400  $\text{m}^2/\text{km}^{-1}/\text{an}^{-1}$  entre 1828 et 1990 (Levassor et al., 1994 ; Gaillard et al., 1998). La figure suivante (fig. 1.4) se rapporte à l'évolution d'une section transversale sur l'Aube au pas de temps annuel. Elle permet d'appréhender les ajustements du lit consécutifs aux variations de débits. Cette figure montre une mobilité forte du lit avec un recul en berge concave de près de 1.5 m entre les basses et les hautes eaux. Ce recul est associé à un surcreusement de la mouille en pied de berge et à la construction d'un banc sablo – graveleux en berge convexe du fait des courants secondaires.

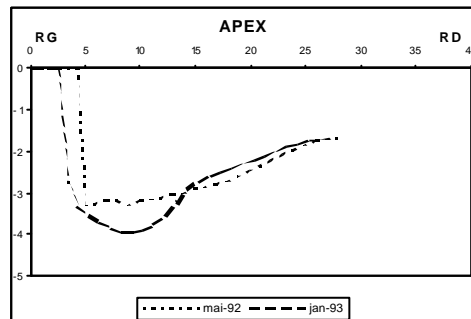


Figure 1.4. Ajustements du lit mineur consécutifs aux variations de débits.

L'analyse de la migration des lits à méandres à différentes échelles constitue une étape importante dans la compréhension de la distribution des biotopes aquatiques et sub – aquatiques en milieu riverain ; ces derniers constituant des zones potentielles d'habitat, de refuge et/ou de nurserie pour les communautés piscicoles. La mobilité horizontale du lit conduit, par exemple, en berge convexe, à la formation de *scroll bars* (bancs de convexité) raccordés par des *swales* (dépressions arquées de convexité). Ces dépressions arquées de convexité sont assimilables aux annexes hydrauliques. Le stade terminal de développement des méandres conduit, de son côté, à des recouvrements de boucles et à la formation d'*oxbow lakes* (bras morts).

## 1.2. Inventaires typologiques.

La figure 1.5 se rapporte aux inventaires typologiques produits sur trois niveaux sur les secteurs d'étude. Ces inventaires ont pour buts de qualifier ces secteurs relativement au système de classification hydro – géomorphologique des zones humides riveraines développé dans le cadre du PIREN – Seine (Gaillard et al., 2001 et 2002) ; l'objectif étant à terme d'extrapoler les résultats acquis par l'équipe du Cemagref sur ces secteurs à des ensembles plus vastes qui présentent les mêmes caractéristiques.

Le pas utilisé pour la segmentation est de 1 km. Globalement, les deux secteurs sont homogènes relativement aux variables hydro – géomorphologiques considérées, avec au niveau 2 des sous – types « emboîtés » dans la nappe de graviers weichsélienne et au niveau 3 des classes caractérisées par des « revêtements holocènes argilo – limoneux ». Au niveau 4, l'intégration de variables décrivant les types de « mosaïques hydro – géomorphologiques » introduit une variabilité relative (fig. 1.5b).

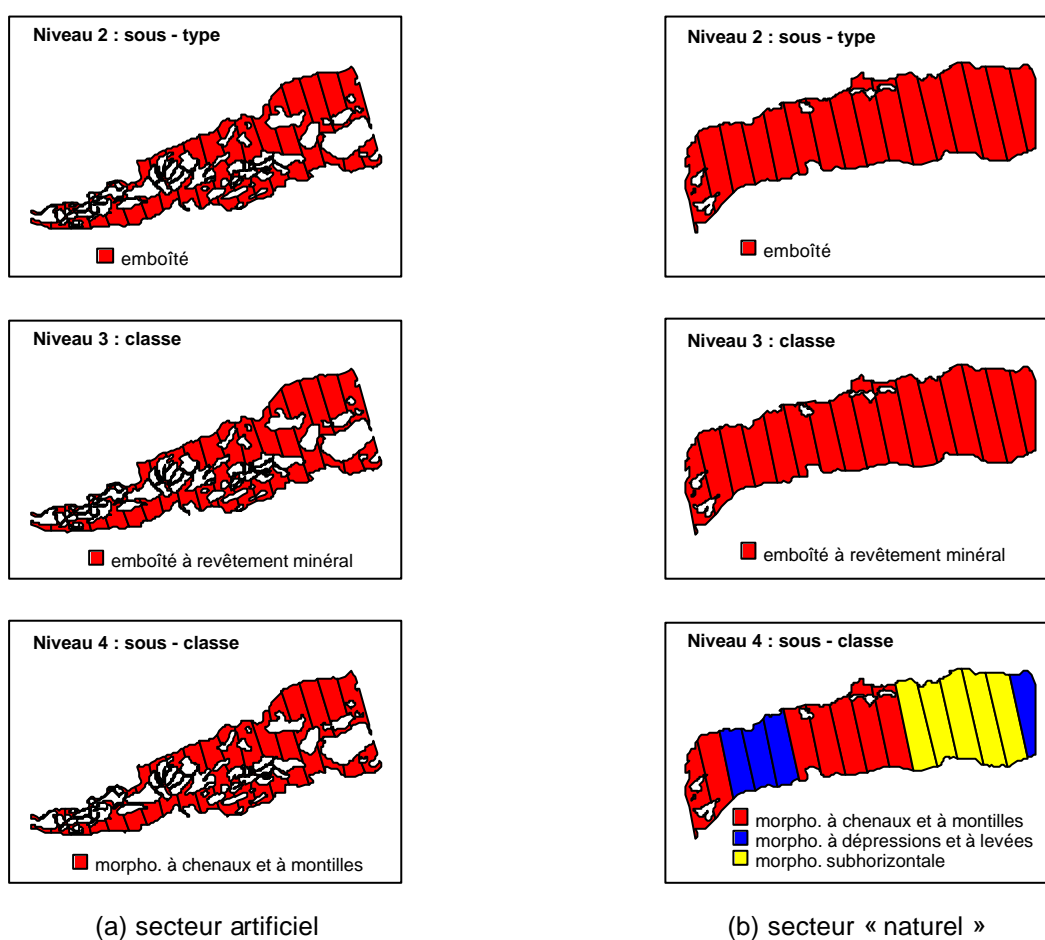


Figure 1.5. Inventaires typologiques de niveaux 2, 3 et 4.

Indépendamment des inventaires qui ont été produits, les bases de données utilisées permettent de caractériser différents paramètres hydro – géomorphologiques relatifs aux paysages fluviaux (cf. rapport sur les zones humides riveraines dans ce cd – rom). A titre d'exemple, la figure 1.6 montre l'évolution de l'indice de sinuosité à différentes dates dans les deux secteurs.

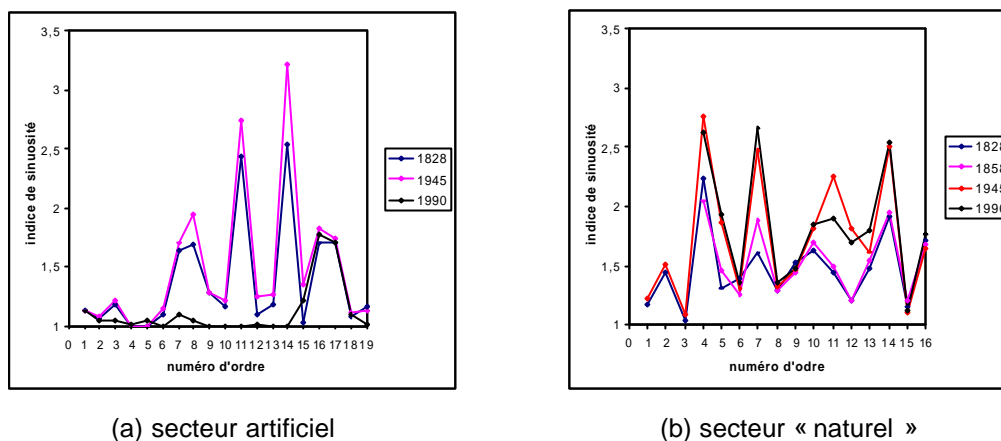


Figure 1.6. Evolution de l'indice de sinuosité de 1828 à 1990.

L'indice de sinuosité est défini comme le quotient de la longueur du lit entre deux points et de la distance à vol d'oiseau entre ces points. Il permet d'appréhender l'évolution dans le temps des méandres et de localiser les secteurs les plus mobiles susceptibles de produire des annexes hydrauliques ainsi que des bras morts.

## 2. Caractérisation de l'organisation spatiale des habitats sub-aquatiques du lit mineur

### 2.1. Introduction

La conservation des espèces menacées s'est traditionnellement intéressée à des populations locales dont l'abondance et la persistance dans des habitats favorables est gouvernée par les facteurs locaux de l'environnement. Or les processus agissant à des échelles plus larges, comme les perturbations, la dispersion ou la structure des mosaïques d'habitats influencent aussi les populations locales. A ces échelles les espèces doivent trouver les milieux qui supportent leurs fonctions vitales et permettent la réalisation de leur cycle de vie. La perception fonctionnelle d'un milieu conduit à la notion d'habitat d'une espèce pour une fonction donnée. Ainsi, pour des espèces «multi-habitats» l'ensemble des habitats forment une unité fonctionnelle dans laquelle l'accès aux différents habitats est réalisé via des processus migratoires (Schlosser, 1995). L'arrangement spatial et la composition de cette unité fonctionnelle, en lien avec le mouvement des organismes, conditionnent des processus clés de la survie des populations de poissons.

La prise en compte de la structure spatiale et de la connectivité des habitats au sein de la mosaïque du paysage comme facteur agissant sur les communautés est un des fondement de l'écologie du paysage ; elle s'intéresse, entre autres, aux écosystèmes anthropisés (Burel and Baudry 1999). Cette approche est maintenant jugée indispensable à une meilleure connaissance des milieux fluviaux (Wiens, 2002) et à l'amélioration de la conservation des organismes aquatiques et des poissons en particulier. Nous avons donc choisi d'adapter les outils de l'écologie du paysage pour caractériser et

quantifier la complexité spatiale des habitats piscicoles à l'échelle du corridor fluvial (lit mineur et majeur). Les outils permettant de caractériser l'organisation spatiale des habitats existent en nombre (O'Neil *et al.*, 1988 ; Vos *et al.*, 2001), il nous faudra donc choisir et adapter ceux qui répondent à notre question.

On s'intéresse plus particulièrement à la phase de reproduction, qui est une phase clé du cycle de vie. L'organisation spatiale des différents milieux de la rivière va influencer le potentiel de différentes frayères en terme de reproduction. Nous souhaitons ainsi caractériser ce potentiel, mais aussi la façon dont les frayères se structurent le long du fleuve, de façon à pouvoir identifier les frayères les plus sensibles ou les plus importantes pour la dynamique des populations de poisson, les frayères isolées, ou encore les lieux où il pourrait être intéressant de restaurer des frayères.

Les indices de caractérisation de l'organisation spatiale des frayères sont appliqués à deux secteurs d'études situés dans la plaine alluviale de la Bassée.

## 2.2. Définition des indices

Pour rendre compte de l'organisation spatiale des habitats des poissons nous nous inspirons d'indices classiques de l'écologie du paysage, mais nous devons les adapter au cas particulier d'un milieu aquatique fluvial.

### 2.2.1. La notion de distance hydrographique.

Tout d'abord, il est nécessaire d'adapter la notion de distance à notre cas d'étude. En effet, la distance usuelle, dite euclidienne<sup>3</sup>, qui est utilisée classiquement en écologie du paysage terrestre, n'est pas adaptée aux populations piscicoles d'un réseau hydrographique, parce que les déplacements des poissons doivent suivre le cours de la rivière. Nous utilisons donc une autre distance, que nous appelons distance hydrographique,  $d_{hydro}$ , et qui correspond à la longueur de l'arc qui relie l'arc A à B en passant par la rivière (figure 2.1).

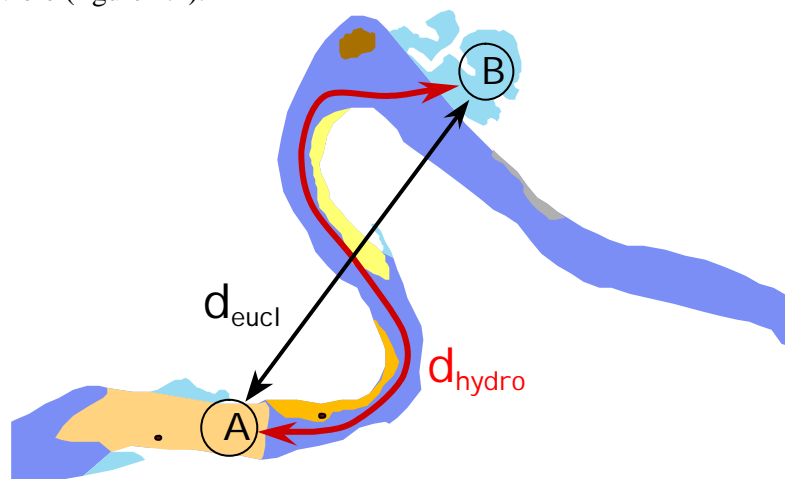


Figure 2.1 : Pour aller de A à B, un poisson doit suivre le cours de la rivière. La distance euclidienne  $d_{eucl}$  n'est donc pas adaptée, ce qui nous oblige à calculer la distance de l'arc A à B en passant par la rivière,  $d_{hydro}$ .

### 2.2.2. La notion de Résistance Cumulée Minimale : une distance "vue" par le Poisson.

Cette distance est une distance physique lié aux milieux en eaux, seuls capables d'abriter des poissons. Cependant, les poissons ne vont pas percevoir de la même façon les différents milieux au sein de la rivière (eau profonde ou plage, zone de fortes vitesses de courant, embâcles) et peuvent préférer un

<sup>3</sup> C'est à dire la distance classique dans le plan, qui est la longueur du segment reliant deux points.



trajet plus long au sens de la distance hydrographique, mais qui passe par des milieux plus favorables (figure 2.2). C'est alors une distance fonctionnelle pour l'organisme considéré.

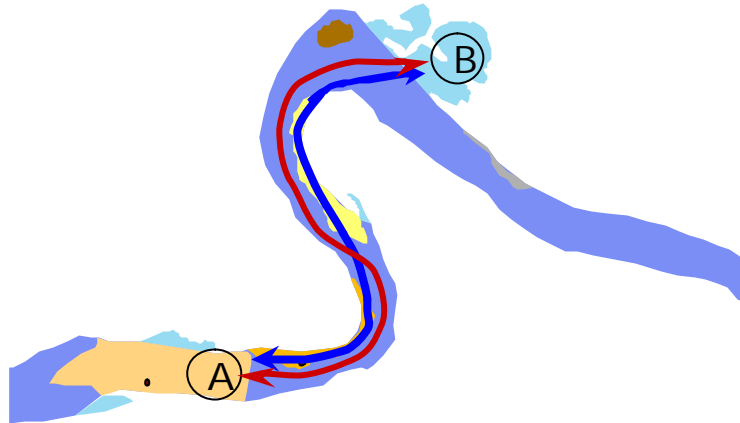


Figure 2.2 : Dans son trajet de A à B, le poisson peut suivre plusieurs chemins, qui vont l'amener à traverser des milieux plus ou moins favorables. Sur cet exemple, seul le chemin bleu évite au maximum les zones de forte vitesse de courant en passant par les zones de plages.

Pour résoudre ce problème, nous avons choisi d'utiliser le concept de Résistance Cumulée Minimale, proposé en écologie du paysage terrestre par (Knaapen, Scheffer *et al.* 1992). La Résistance Cumulée entre A et B est un indice de distance entre les deux points A et B qui prend en compte les différents milieux rencontrés sur le chemin reliant A et B. A chaque milieu  $m$ , on attribue une résistance  $r(m)$  qui mesure la difficulté qu'aura l'animal considéré (ici le poisson) à traverser une distance unitaire de ce milieu. On peut par exemple considérer que cette résistance est proportionnelle au coût énergétique du déplacement<sup>4</sup>.

La Résistance Cumulée entre A et B,  $RC(A,B)$ , est alors l'intégrale, sur le chemin considéré, des résistances des milieux traversés (équation a). Elle correspond en fait à la distance équivalente que le poisson aurait à parcourir dans le milieu le plus favorable pour dépenser la même énergie que celle qu'il doit dépenser sur le chemin choisi. La figure 2.3 illustre un exemple de calcul de Résistance Cumulée.

Equation a : 
$$RC(A,B) = \int_{\text{chemin}} r(x) dx$$

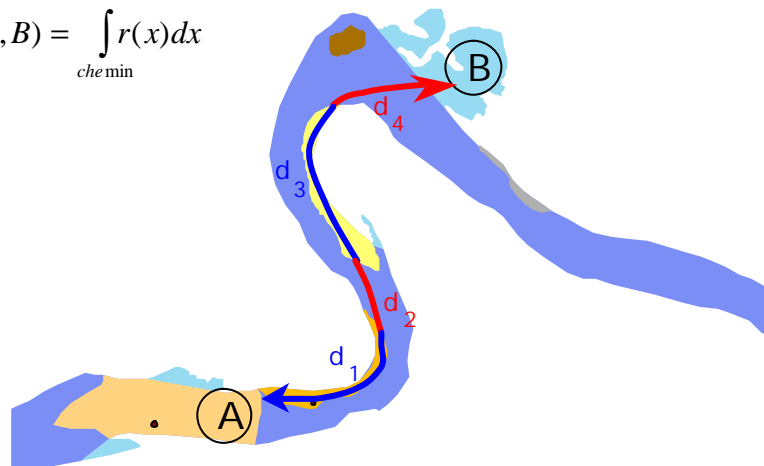


Figure 3 : Pour le chemin de A à B, le poisson traverse le milieu "rivière" rouge sur les distances d2 et d4, et le milieu "plage" bleu sur la distance d1 et d3. La résistance cumulée de ce trajet vaut donc :  $RC(A,B) = (d1+d3)*r(\text{plage}) + (d2+d4)*r(\text{rivière})$ .

<sup>4</sup> Considérons que pour le milieu le plus favorable la résistance est de  $r=1$ . Soit  $E(m)$  l'énergie dépensée pour traverser une distance unitaire de 1m dans le milieu  $m$ . Alors la résistance  $r(m)$  du milieu  $m$  correspond à la distance que le poisson doit parcourir dans le milieu le plus favorable pour dépenser la même énergie  $E(m)$ .



Nous voyons donc que, pour pouvoir utiliser cette Résistance Cumulée, il est nécessaire de déterminer, pour chaque groupe écologique, une valeur de résistance correspondant à chaque milieu de la mosaïque fonctionnelle. Le tableau 2.1 illustre un exemple des valeurs de résistance qui pourraient être utilisées pour une espèce virtuelle rhéophile (Le Pichon *et al.*, 2001) : dans ce cas le milieu le plus favorable est une zone de vitesse moyenne avec ripisylve, et les autres milieux sont d'autant plus résistants qu'ils sont difficiles à traverser pour l'espèce considérée.

Tableau 2.1 : Exemple de résistances pour les différents milieux, définis par la vitesse du courant et la présence de ripisylve, proposées pour une espèce virtuelle rhéophile.

milieu	résistance
Vi moyen avec ripisylve	r = 1
Vi moyen sans ripisylve	r = 2
Vi fort avec ripisylve	r = 3
Vi fort sans ripisylve	r = 5
Vi faible avec ou sans ripisylve	r = 2

Il reste toutefois un dernier problème : quel chemin choisir pour mesurer la Résistance Cumulée entre A et B ? En effet, on voit sur la figure 2.2 qu'il y a en fait de nombreux chemins possibles pour aller de A à B en restant dans la rivière, et il est possible pour chaque chemin de calculer une Résistance Cumulée. Nous avons donc choisi comme (Pain *et al.*, 2000) d'utiliser la notion de Résistance Cumulée Minimale, qui correspond à la valeur minimale des Résistances Cumulées calculées sur tous les chemins possibles pour aller de A à B (équation b). En fait, cela revient à faire l'hypothèse que le poisson choisit le chemin le plus court au sens de la résistance cumulée<sup>5</sup>.

Equation b :

$$RCM(A, B) = \underset{\substack{\text{chemins} \\ \text{possibles}}}{\text{Min}} \left( \int_{\text{chemin}} r(x) dx \right)$$

### 2.2.3. La notion d'accessibilité des frayères.

Dans un premier temps, nous souhaitons caractériser l'influence de l'organisation spatiale des différents milieux de la rivière, particulièrement à proximité des frayères, sur le potentiel de celles-ci en terme de reproduction. Nous faisons l'hypothèse que ce potentiel est fortement influencé par la facilité avec laquelle les poissons adultes peuvent accéder à la frayère considérée : on s'attend à ce qu'une frayère isolée, entourée d'un milieu défavorable aux adultes, joue un rôle moins important qu'une frayère facilement accessible et à proximité immédiate d'une zone d'habitat favorable (figure 2.4).

<sup>5</sup> Cette hypothèse est souvent avancé notamment dans la théorie de l'«optimal foraging».

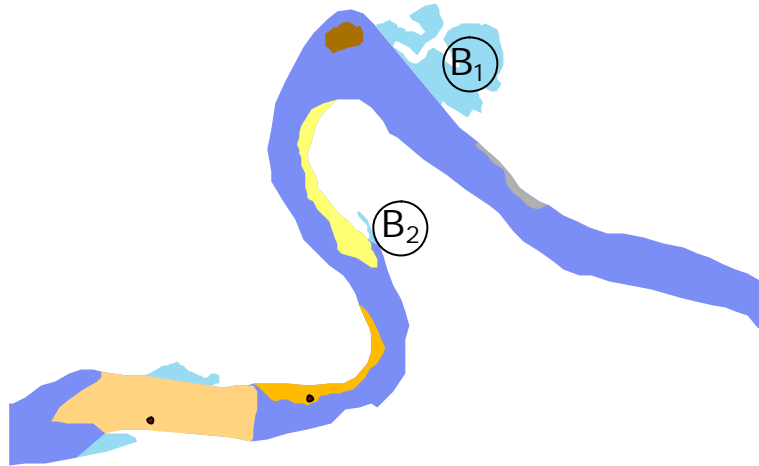


Figure 2.4 : La frayère  $B_2$ , proche de zones de plages favorables, est plus accessible que la frayère  $B_1$ .

Nous avons donc construit un indice pour mesurer l'accessibilité  $Acc$  de chaque frayère. Pour cela, nous avons choisi d'estimer le nombre moyen d'adultes qui pourraient venir pondre dans chaque frayère, en tenant compte de la plus ou moins grande facilité pour ces adultes à venir de leur habitat usuel à cette frayère en fonction de la distance à parcourir et de l'organisation spatiale des différents habitats.

Considérons un adulte présent dans une zone  $A_i$  de la rivière<sup>6</sup>. Il nous faut estimer la probabilité que cet adulte aille pondre dans le frayère située dans la zone  $B$  (figure 2.5). *A priori*, cette probabilité est d'autant plus faible que la distance est grande, au sens de la Résistance Cumulée Minimale<sup>7</sup>. Ainsi, s'il faut traverser une très grande distance, même dans une zone favorable, ou une distance moyenne dans une zone défavorable, il y a peu de chance que l'adulte considéré atteigne la frayère. Nous avons donc choisi d'utiliser une fonction décroissance de la RCM entre  $A_i$  et  $B$  pour modéliser cette probabilité d'aller de la zone  $A_i$  à la frayère située en  $B$  (équation c). Cette fonction peut avoir la forme d'une fonction exponentielle décroissante (figure 2.6) ou d'une gaussienne ou d'une fonction avec palier, caractérisée par le paramètre  $a$ , qui donne l'ordre de grandeur de la distance pour laquelle la probabilité devient faible. Pour  $x = \alpha$ , la probabilité vaut environ 0,36. On peut considérer qu'au delà d'une distance de quelques  $\alpha$  (par exemple  $10\alpha$ ) la probabilité associée devient négligeable. Le paramètre  $\alpha$  est donc un paramètre essentiel de cette étude, qui correspond à la distance moyenne que peut parcourir un adulte pendant la période de reproduction. Il conviendra de l'évaluer, pour chaque groupe écologique, à partir de la littérature.

<sup>6</sup> Pour le calcul des indices, qui se fait en mode raster (la carte est une grille dont chaque case est un pixel), cette zone  $A_i$  correspond à un pixel de coordonnées  $(x, y)$ ,  $B$  est constituée de plusieurs pixel.

<sup>7</sup> Cette probabilité devra aussi varier en fonction des positions respectives de  $A_i$  et  $B$  puisqu'il faut prendre en compte l'asymétrie de la migration de reproduction qui est plus probable vers l'amont.

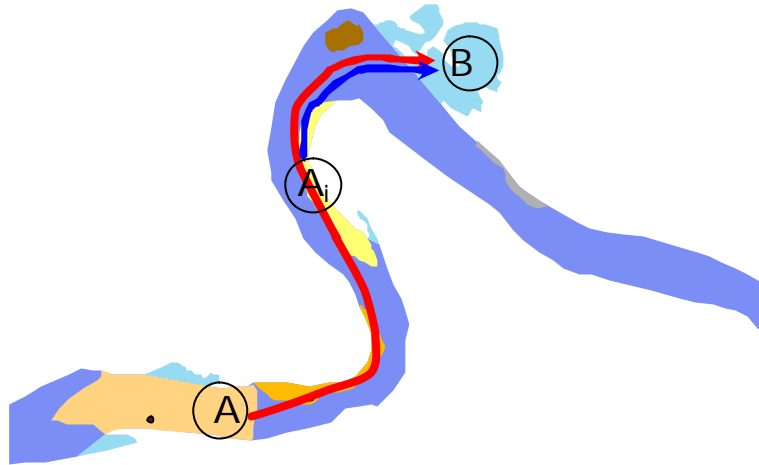


Figure 2.5 : La probabilité qu'un adulte situé en **A** atteigne la frayère **B** est faible, car le chemin entre **A** et **B** est long au sens de la Résistance cumulée. Par contre, un adulte situé en **A<sub>i</sub>** a une plus grande probabilité d'atteindre la frayère **B**.

Equation c : 
$$Proba(A_i, B) = e^{-\frac{RCM(A_i, B)}{a}}$$

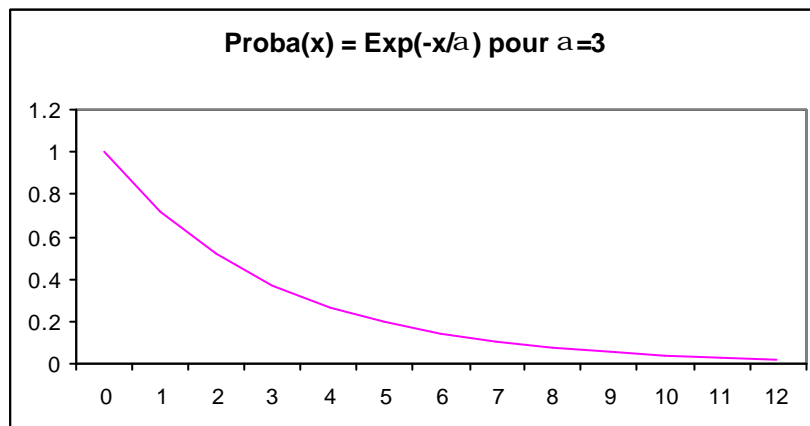


Figure 2.6 : Exemple de forme de la fonction de probabilité , exponentielle décroissante.

Pour estimer le nombre moyen d'adultes susceptibles de venir pondre dans chaque frayère, nous allons maintenant considérer l'une après l'autre toutes les zones **A<sub>i</sub>** de la rivière, et estimer le nombre d'adultes de cette zone **A<sub>i</sub>** venant pondre dans la frayère **B**. Puis nous ferons la somme des contributions de chaque zone **A<sub>i</sub>**.

Le nombre d'adultes présents dans une zone **A<sub>i</sub>** donnée dépend *a priori* du type d'habitat de la zone **A<sub>i</sub>** considérée. La mesure absolue de cette information est délicate, mais les pêches électriques effectuées dans les stations de mesure peuvent nous donner une idée de la densité d'adultes par unité de surface pour un milieu donné. On notera  $den(A_i)$  cette mesure (en nombre d'adultes par surface).

Pour une zone **A<sub>i</sub>** donnée, le nombre d'adultes de cette zone **A<sub>i</sub>** qui viendra pondre dans la frayère **B** est égal au produit de la densité  $den(A_i)$  avec la probabilité d'aller de **A<sub>i</sub>** à **B** :  $Proba(A_i, B)$ .

Finalement, l'équation d permet de définir notre indice d'Accessibilité pour la frayère B,  $Acc(B)$ , comme le nombre moyen d'adultes pouvant venir pondre dans cette frayère. Notons que  $Acc(B)$  a une valeur relative, et permet de comparer l'accessibilité de différentes frayères, mais ne saurait se voir attribuer une valeur absolue, car les mesures de densités sont elles aussi relatives. Elles doivent donc être considérées avec précaution.

Equation d :

$$Acc(B) = \sum_{zones A} den(A_i) * Proba(A_i, B) = \sum_{zones A} den(A_i) * e^{-\frac{RCM(A_i, B)}{a}}$$

Nous voyons que, pour pouvoir utiliser notre indice d'accessibilité, outre les valeurs de résistance définies au paragraphe, et le paramètre  $a$  de la fonction de probabilité, il est encore nécessaire de déterminer, pour chaque groupe écologique, une valeur de densité correspondant à chaque milieu de la mosaïque fonctionnelle. Le tableau 2.2 illustre un exemple des valeurs de densité qui pourraient être utilisées pour une espèce virtuelle rhéophile (Le Pichon *et al.*, 2001) : dans ce cas le milieu le plus favorable est une zone de vitesse moyenne avec ripisylve.

Tableau 2.2 : Exemple de densités pour les différents milieux, définis par la vitesse du courant et la présence de ripisylve, proposées pour une espèce virtuelle rhéophile.

milieu	Densité (/100m <sup>2</sup> )
Vi moyen avec ripisylve	d = 10
Vi moyen sans ripisylve	d = 8
Vi fort avec ripisylve	d = 3
Vi fort sans ripisylve	d = 2,5
Vi faible avec ou sans ripisylve	d = 1

L'indice d'Accessibilité ainsi construit répondrait à notre première question : il permet de comparer la facilité pour les adultes d'atteindre les différentes frayères, et permet également d'identifier les frayères difficilement accessibles, ou de tester si une frayère restaurée serait effectivement utilisable par les adultes. On s'attend à ce que le nombre de juvéniles présents dans les frayères soit en partie expliqué par la valeur de l'accessibilité.

#### 2.2.4. Comment se structurent les frayères les unes par rapport aux autres ?

Les deux indices définis précédemment permettent de caractériser les propriétés de chaque frayère, mais n'apportent pas d'information globale sur la structure des frayères le long de la rivière. En particulier, ils ne permettent pas d'identifier les zones sans frayères.

Nous proposons donc de compléter ces outils par une carte (pour chaque groupe écologique), sur laquelle nous ferons figurer chaque frayère, ainsi que, pour chaque pixel, la distance à la frayère la plus proche (au sens de la Résistance Cumulée Minimale) ou la probabilité d'atteindre la frayère la plus proche. La figure 2.7 illustre le principe de la carte de probabilité d'atteindre la frayère la plus proche. Une telle carte permet d'identifier très facilement les zones qui sont très éloignées de toutes les frayères, ainsi que les relations de proximité entre frayères pour chaque groupe écologique. Elle permet également d'évaluer l'intérêt de différents sites pour d'éventuels travaux de réhabilitation afin de rétablir la connectivité fonctionnelle du cours d'eau.

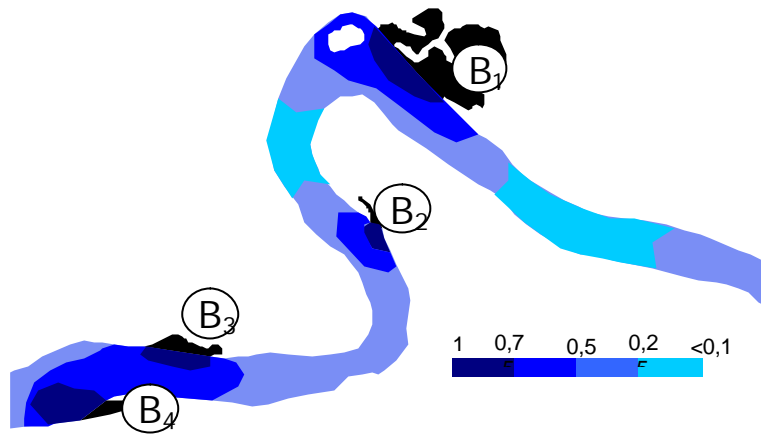


Figure 2.7 : Principe de la carte de probabilité d'atteindre la frayère la plus proche : les frayères sont en noir ; le gradient de couleur de la probabilité du bleu foncé au bleu clair correspond à une échelle de 1 à <0,1. On voit qu'un poisson situé dans le secteur des frayères B2, B3 et B4 a toujours une probabilité supérieure à 0,25 d'atteindre une frayère. Dans ce cas, la frayère B1 est isolée des autres par la zone de probabilité < 0,25.

Pour réaliser cette carte, il suffit en fait de calculer pour chaque zone  $A_i$  le nouvel indice  $D_{frayère}(A_i)$ , distance (au sens de la Résistance Cumulée Minimale) entre  $A_i$  et la frayère la plus proche  $B_j$ , défini par l'équation g.

Equation g :

$$D_{frayère}(A_i) = \underset{frayèreB}{Min}(RCM(A_i, B_j))$$

## 2.3. Implémentation

### 2.3.1. Implémentation

Nous avons implémenté le calcul des différents indices sous la forme d'un logiciel développé en langage Java. Ce logiciel est composé de l'application (traitement des données, calcul des indices...) et d'une interface graphique.

La structure du logiciel est donnée sur le diagramme de classe (cf. figure 2.8).

L'application se compose de trois paquets :

- Le paquet *paysage aquatique* qui contient principalement la classe rivière qui effectue tous les opérations d'entrées sortie et les calculs des indices,
- Le paquet *outils* qui contient différents outils génériques comme la gestion des matrices creuses (cf. prochain paragraphe) et la gestion des voisinages (possibilité d'utiliser un voisinage d'ordre 4 ou 8, ...),
- Le paquet *interface homme machine (ihm)* pour la visualisation.

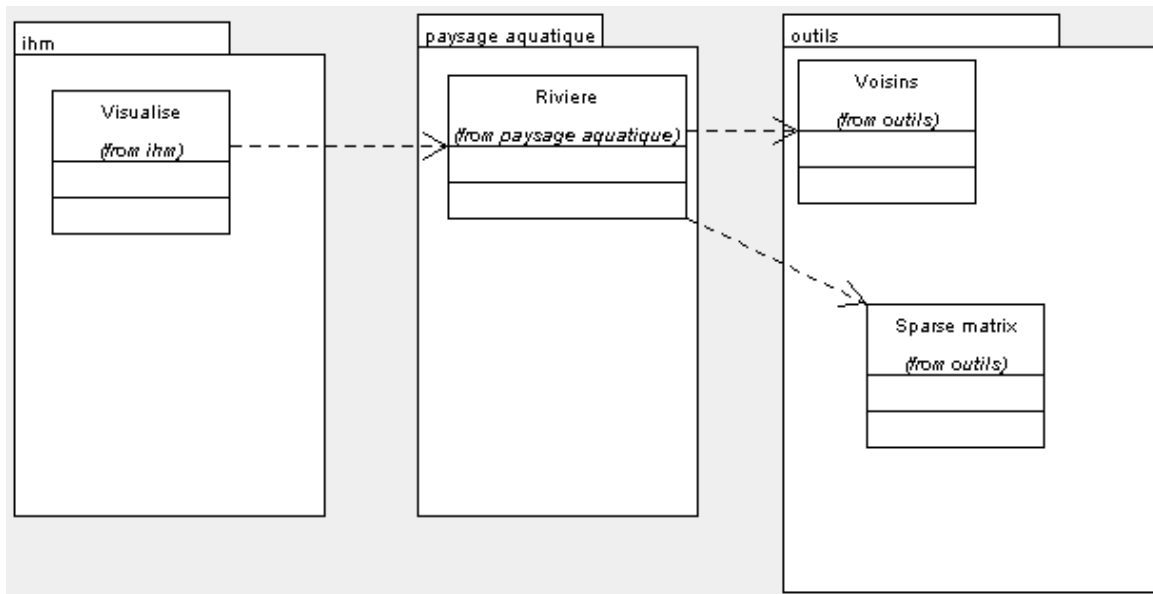


Figure 2.8 : Diagramme de classe simplifié de l'application

Nous nous focaliserons plus particulièrement sur deux points : l'un concernant la gestion de l'espace mémoire et l'autre concernant l'interface graphique.

### 2.3.2. Optimisation de la mémoire par des matrices creuses

Le calcul de ces indices pose quelques problèmes informatiques de gestion de la mémoire. En effet, les matrices correspondant aux mosaïques utilisées à l'échelle considérée représentent des volumes de données qui ne peuvent être traités directement. Par exemple, le bief sub-naturel de Conflans à Nogent (cf. figure 2.9) correspond à une longueur de rivière de 25 km, avec une taille de pixel de 1 mètre de côté cela représente une matrice de 14 000 pixels \* 6000 pixels dont seulement 1 à 2 % des pixels correspondent à la rivière, le reste étant en dehors de la rivière. Il faut donc utiliser le formalisme des matrices creuses pour gérer ces matrices.

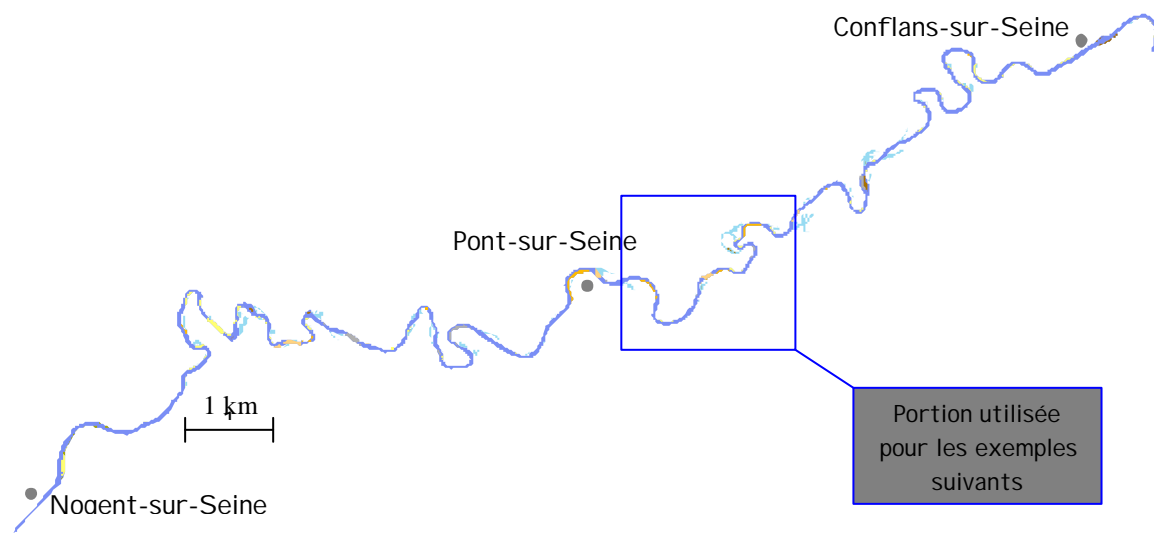


Figure 2.9 : Mosaïque physique pour le bief Bief sub-naturel de Conflans à Nogent (environ 25 km de rivière)

Une modélisation creuse de matrice est une représentation qui stocke seulement les coefficients non nuls de celle-ci. Ce qui donne pour avantages :

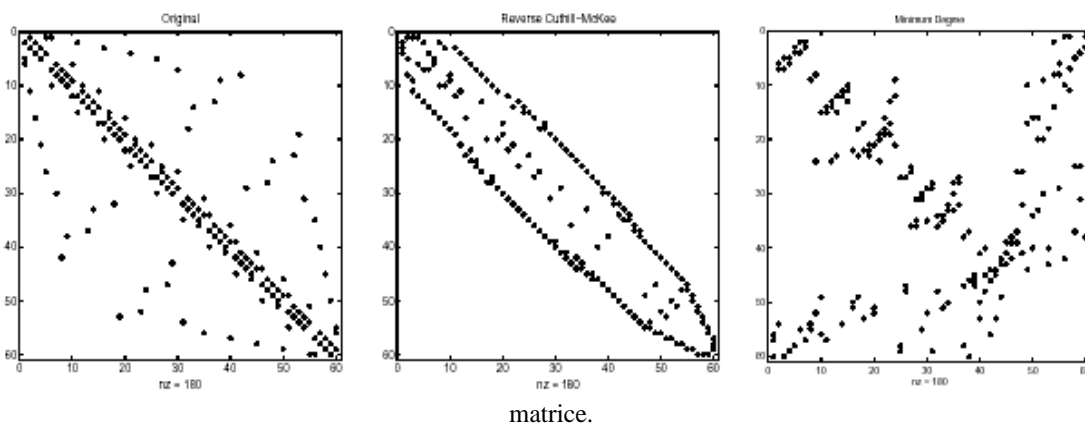
- Un gain de place selon le taux de remplissage de la matrice,

- Une connaissance, partant d'un coefficient non nul donné, du prochain coefficient non nul selon la ligne et/ou la colonne de manière très efficace. Cela traduit un gain immédiat dans les opérations de calcul sur celle-ci.

Pour inconvénient, nous aurons certainement une perte d'efficacité quant à l'accès à la valeur d'un emplacement quelconque de la matrice.

Pour les matrices pleines tous les éléments de la matrices sont stockés, les valeurs inexistantes requièrent la même place de stockage que les autres éléments de la matrice. Pour les matrices creuses nous stockons seulement les éléments non nuls et leurs indices. Pour de grosses matrices avec un faible pourcentage d'éléments non nuls ce schéma de stockage réduit de façon importantes la quantité de mémoire allouée. Cette approche de stockage en matrice creuse est assez répandue dans les problèmes d'optimisation, une littérature importante existe sur le sujet (Saad, 1996, Saad et Sosonkina, 1999). La figure 2.10 montre quelques exemples de matrices creuses.

Figure 2.10: Exemple de structures de matrices creuses. Les points représentant les éléments non nuls de la



Pour le stockage de la matrice creuse nous utilisons trois vecteurs. Si l'on considère une matrice creuse de  $m$  lignes par  $n$  colonnes avec  $nnz$  éléments non nuls.

- Le premier vecteur contient tous les  $nnz$  éléments non nuls.
- Le second vecteur contient les indices des colonnes des  $nnz$  éléments non nuls.
- Le troisième vecteur contient les pointeurs des indices du début de chaque colonnes des autres vecteurs et un pointeur additionnel qui contient le dernier élément. Ce vecteur contient  $m+1$  éléments.

### 2.3.3. Proposition d'interface

Une première version de l'interface a été développée en java Swing, elle sera étoffée dans le courant de l'année 2003.

L'interface est composée de 4 panneaux principaux (4 onglets des figures 2.11 et 2.12):

- **Le panneau des données** (figure 2.11) permet :
  - ❖ De charger une mosaïque physique raster soit sous format de matrice creuse ou pleine



- ❖ De charger et de sauvegarder les paramètres physiques de la rivière (codes décrivant le type d'éléments, les îles, les annexes, les plages et leur substrat etc...), écologiques (résistance des milieux au déplacement des poissons, densité des poissons adultes... pour les différents groupes écologiques considérés). Les données sont écrites et sauvegardées sous format .xml par souci de compatibilité.
- ❖ De calculer les indices écologiques voulus (distance écologique ou résistance cumulée minimale, indice d'accessibilité, probabilité d'atteindre la frayère la plus proche ...)
- **Le panneau de visualisation** (figure 2.12) permet de visualiser les différentes cartes au cours de l'analyse (un exemple de visualisation de mosaïque physique est donnée sur la figure 2.13). Pour la visualisation nous avons ajouté un outil d'analyse d'image (ImageJ figure 2.14) qui permet d'analyser les cartes obtenues (zoom, détection de contour, lissage, ...)

**Les panneaux analyse de sensibilité et optimisation** ne sont pas encore implémentés. Ils permettront de faire une analyse plus précise sur les différents paramètres utilisés pour le calcul des indices.

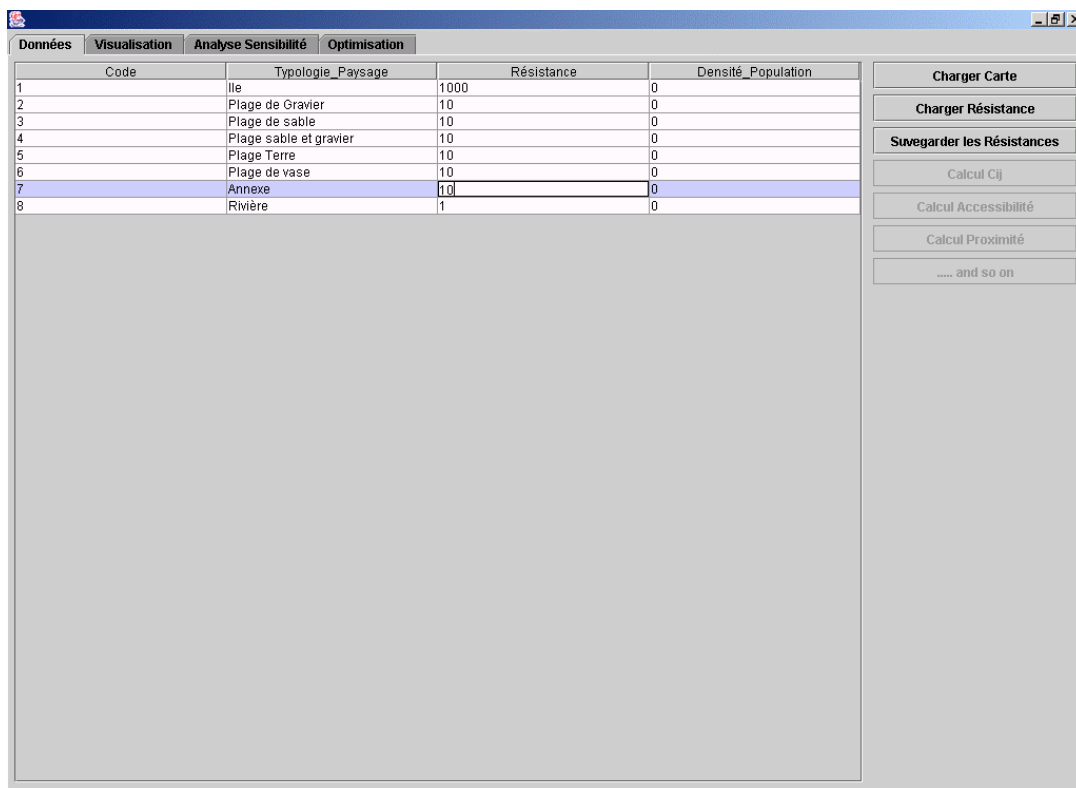


Figure 2.11 Interface du panneau pour la gestion des données.

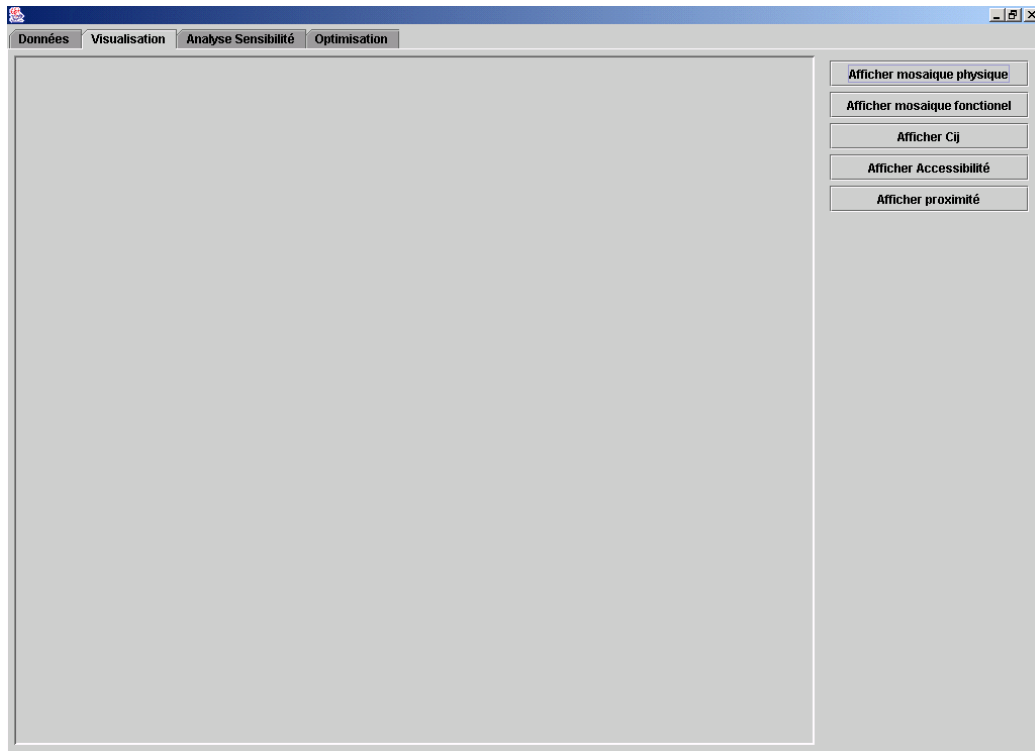


Figure 2.12 Interface du panneau pour la visualisation des données.

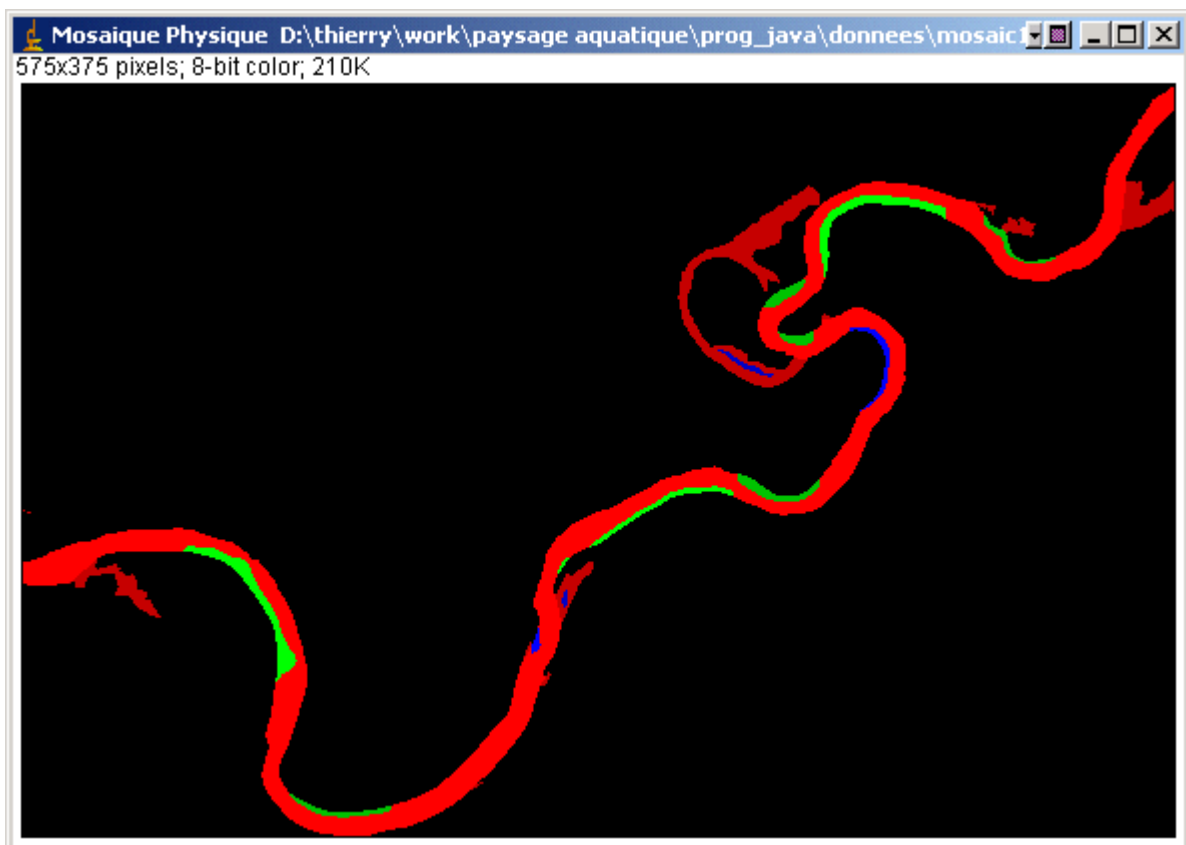


Figure 2.13 Exemple de visualisation de mosaïque physique sur la portion délimitée figure 2.9.

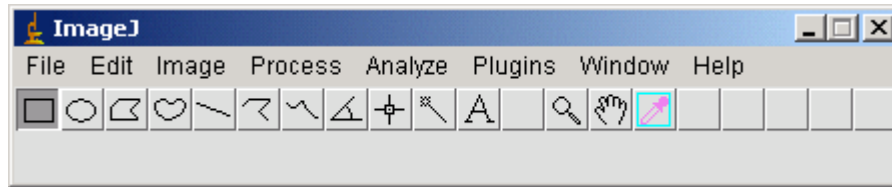


Figure 2.14 Interface de l'utilitaire de traitement d'image (ImageJ).

## 2.4. Un exemple virtuel

Pour illustrer ces calculs d'indices, nous proposons ici une application effectuée sur un exemple virtuel de paysage aquatique, pour une espèce virtuelle de poisson ...

### 2.4.1. Présentation de l'exemple

L'exemple que nous donnons est réalisé sur une portion du bief sub-naturel, représentant quelques kilomètres de rivière en amont de Pont-sur-Seine (voir figure 2.9). On considère une espèce de poisson dont les frayères seraient les plages de sable ou de graviers.

Le tableau 2.3 donne les coefficients de résistances et de densités utilisés dans l'exemple virtuel pour les 8 types d'éléments de la mosaïque physique considérés.

Tableau 2.3 Mosaïque physique, résistance et densité pour l'exemple virtuel.

Code	Élément de la mosaïque	résistance	densité
1	Plage gravier	1	10
2	Plage sable	1	10
3	Plage sable/gravier	1	10
4	Plage terre	1.5	5
5	Plage vase	2	5
6	Annexe	10	1
7	Rivière	5	3
8	Ile	1000	0
-9999	Hors rivière	1000	0

La forme de la courbe de probabilité utilisée est la suivante :

$$Proba(A_i, B) = e^{-\frac{RCM(A_i, B)}{\alpha}}$$

Avec  $\alpha = 200$  m, distance moyenne que peut parcourir un adulte lors d'une migration de reproduction.

### 2.4.2. Résultats

Les figures 2.15 et 2.16 montrent respectivement les cartes des résistances cumulées et de la probabilité associée sur cette portion de rivière. Les coefficients  $C(A_i, B)$  augmentent de part et d'autre de la frayère considérée et la figure 2.16 montrent l'effet prépondérant du paramètre  $\alpha$ , qui donne

l'ordre de grandeur de la distance parcourue. Avec la fonction de décroissance utilisée (exponentielle) la probabilité devient négligeable ( $<0,1$ ) à partir de 2 à 3 **a**.

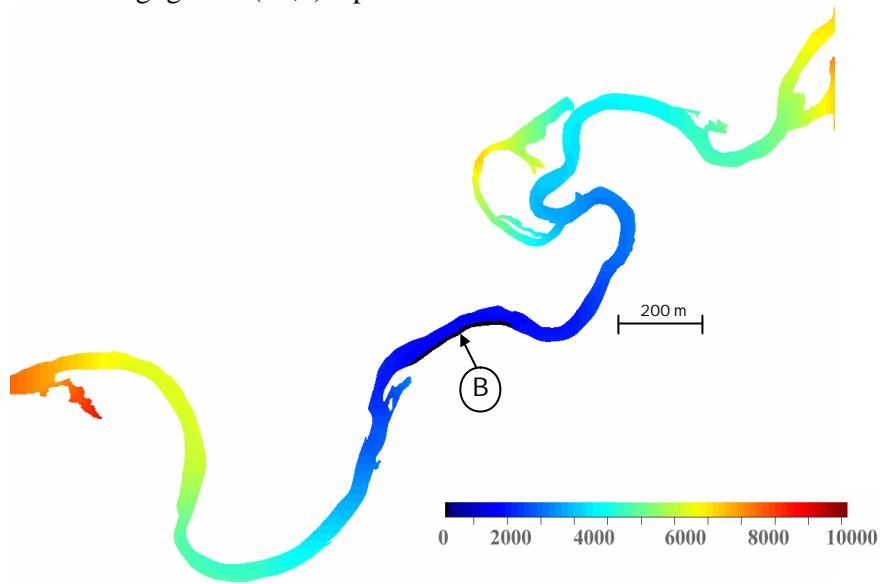


Figure 2.15 Calcul de la  $RCM(A_i, B)$  sur une frayère B du bief sub-naturel. L'échelle de couleur est en équivalent mètres.

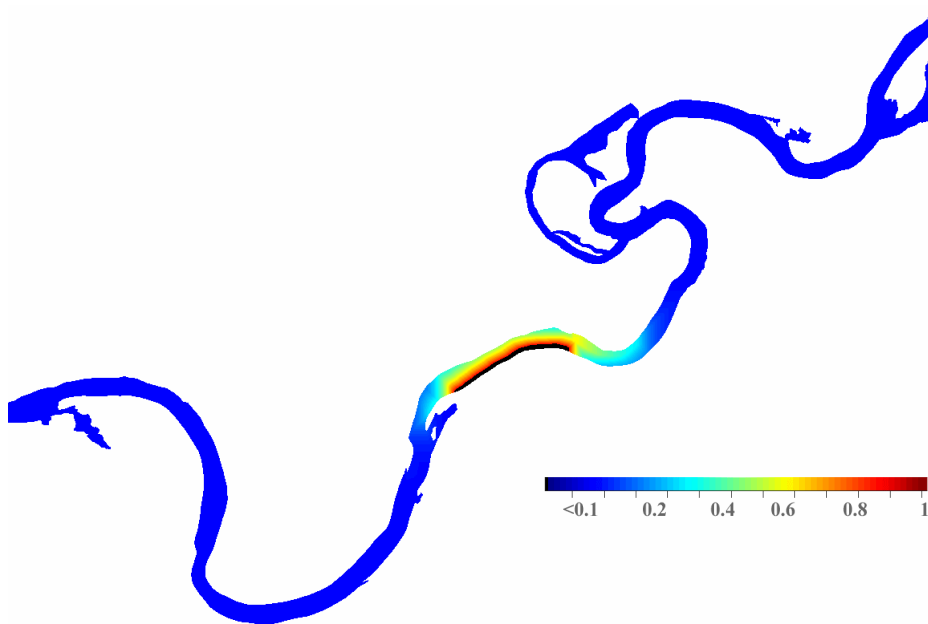


Figure 2.16 Calcul de la probabilité  $P(A_i, B)$  pour un adulte présent en  $A_i$  atteigne une frayère B du bief sub-naturel. Echelle de probabilité de <math><0.1</math> à 1.

Enfin la figure 17 donne la carte des probabilités à chaque point de la rivière pour atteindre la frayère la plus proche. Cette carte montre la différence entre les frayères fortement connectées (zone C) et celles plus isolées (zone I).

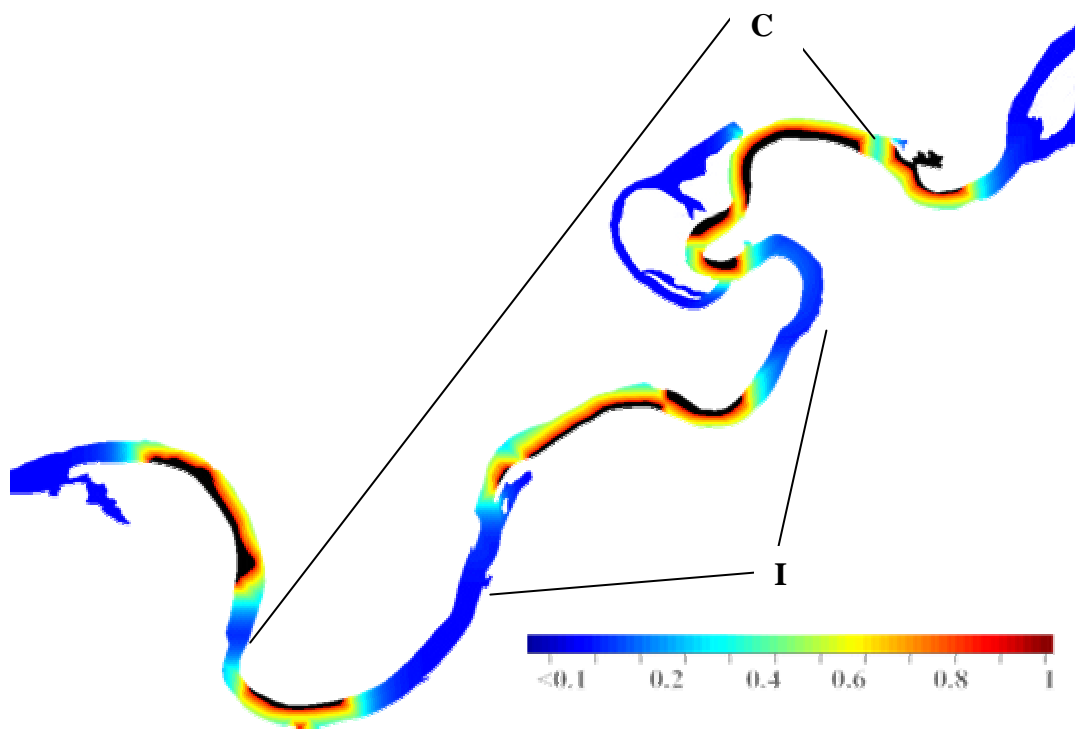


Figure 2.17 Carte des probabilités d'atteindre la frayère la plus proche.

### 2.4.3. Conclusion

Pour étudier comment l'organisation spatiale des différents milieux de la rivière peut influencer sur le potentiel des différentes frayères en terme de reproduction, nous proposons donc de calculer pour chaque groupe écologique :

- L'Accessibilité *Acc*, qui donne une mesure de la facilité, pour les adultes de la rivière, de venir jusqu'à la frayère considérée
- Une carte pour identifier très facilement les zones qui sont très éloignées de toutes les frayères, ainsi que les relations de proximité entre frayères.

Pour utiliser ces outils, il sera nécessaire de préciser un certain nombre de paramètres, et plus précisément, pour chaque groupe écologique : (i) la mosaïque fonctionnelle, (ii) les estimations des densités d'adultes pour chaque habitat, (iii) les estimations des résistances pour chaque habitat, et (iv) une estimation du paramètre  $\mu$ , qui mesure la distance moyenne parcourue par un adulte pour pondre.

## Références bibliographiques

- Burel, F. and J. Baudry (1999). Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications, Tec et Doc. 359p.
- Dzana J. G., (1997). Le lit de la Seine de Bar à Montereau: Etude morphodynamique, rôle des aménagements, Thèse de Géographie: Université de Paris I, 411 p.
- Gaillard S., Sebilo M., Brunstein D., N'guyen-The D., Grably M., Fustec E., Benjoudi H., Bravard J. P., Amezal A., Billen G., Mariotti A., (2002). « Typologie et fonctions des zones humides riveraines », Rapport d'activité 2001 (Piren - Seine), Thème 1: Agriculture et qualité des eaux, CNRS, Université Paris 6 ed., cd - rom téléchargeable sur [http://www.sisyphes.jussieu.fr/cd\\_piren](http://www.sisyphes.jussieu.fr/cd_piren), 32 p.
- Gaillard S., Amezal A., Bravard J. - P., Fustec E., Benjoudi H., Brunstein D., N'guyen-The D., (2001). Inventaire et fonctions des zones humides dans le bassin de la Seine, In Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Région Rhône - Alpes, Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse ed., Actes du Colloque Scientifiques et Décideurs : agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux (6 - 7 - 8 juin 2001 : Atelier 3), cd - rom téléchargeable sur <http://www.eaurmc.fr>, 11 p.
- Gaillard S., Levassor A., Mussot R., Dzana J.G., Bomer B., Godard A., (1999). Fonctionnement du lit fluvial de la Seine à différentes échelles de temps et d'espace, In Le Coz C., Tassin B., Thévenot D. ed., Pluie et Environnement (Actes des huitièmes journées du Diplôme d'Etudes Approfondies : Sciences et Techniques de l'Environnement), Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 97-111.
- Gaillard S., (1999). L'Aube : dynamique morphosédimentaire holocène et fonctionnement actuel d'un hydrosystème à faible énergie, Thèse de Géographie : Université Paris IV, 238 p.
- Knaapen, J. P., M. Scheffer, et al. (1992). "Estimating habitat isolation in landscape planning." Landscape and Urban Planning 23(1): p. 1-16.
- Le Pichon C., Gorges G., Goreaud F. et Baudry J. (2001). Vers une écologie des paysages sub-aquatiques fluviaux. Poster présenté aux VIII èmes journées françaises de l'Association Internationale pour l'Ecologie du Paysage (IALE), les 3, 4 & 5 Octobre 2001 à Rouen.
- Levassor A., Dzana J. G., Gaillard S., (1994). " Sur l'évolution historique de la Seine et de l'Aube", Rapport d'activité 1994/II (Piren-Seine), Thème : Corridor fluvial, analyse et modélisation des systèmes fluviaux anthropisés, 66 p.
- O'Neill, R. V., J. R. Krummel, et al. (1988). "Indices of landscape pattern." Landscape Ecology 1(3): p. 153-162.
- Pain, G., J. Baudry, et al. (2000). "LandPop:un outil d'étude de la structure spatiale des populations animales fragmentées." Géomatique: p. 89-106.
- Saad, Y. (1996). "Iterative methods for sparse linear systems", PWS Publishing, Company, Boston.
- Saad, Y. and Sosonkina, M. (1999). Distributed Schur Complement Techniques for General Sparse Linear Systems, SIAM J. Sci. Comput., 21(4): p. 1337-1356.
- Schlosser, I. J. (1995). «Critical landscape attributes that influence fish population dynamics in headwater streams.» Hydrobiologia p. 303: 71-81.
- Schumacker, N. H. (1996). "Using landscape indice to predict connectivity." Ecology 77: p. 1210-1225.
- Thorne C. R., Lewin J., (1979). "Bank processes, bed material movements and planform development in meandering river", In Rhodes D. D., Williams G. P. ed., Adjustments of the fluvial system, London : Allen & Unwin, p.117-137.
- Vos, C. C., J. Verboom, et al. (2001). "Toward ecologically scaled landscape indices." Amer Naturalist 157(1): p. 24-41.
- Wiens, J. A. (2002). «Riverine landscapes: Taking landscape ecology into the water.» Freshwater Biology 47(4): p.501-515.