

DIREN Centre Service de Bassin Loire Bretagne



Etude expérimentale de la mesure de l'impact de différents projets d'aménagement de la Loire



RIVE

Gestion des cours d'eau et des zones humides

ETUDE - CONSEIL - INGENIERIE

SARL au capital de 7 700 euros

RCS TOURS 433 888 609 : Code APE - NAF 742C

Michel Bacchi
Pierre Alain Moriette
Octobre 2002

Préambule

Ce rapport a été demandé au bureau d'étude RIVE par La DIREN CENTRE, Service de Bassin Loire Bretagne.

L'objectif de la présente étude est de permettre une description de la qualité des habitats macrobenthiques du site d'Ingrandes et de permettre une évaluation de l'impact des travaux sur l'hydrosystème par la conception d'un modèle de description des habitats macrobenthiques en Loire.

Ce travail complète les différents inventaires réalisés dans d'autres domaines comme la végétation, la géomorphologie..., et doit permettre à terme d'assurer une meilleure gestion de l'hydrosystème Loire.

Cette étude n'a donc pas pour objet de décrire les peuplements en place, qu'il serait d'ailleurs très difficile à caractériser compte tenu de la très grande variabilité spatiale et temporelle de cet hydrosystème (Bacchi, 2000), mais a pour objectif, d'estimer, sur la base de l'étude approfondie des habitats, leur potentialités faunistiques (macro-invertébrés) en dehors de tout autre facteur influant (par exemple la pollution des eaux).

Pour pouvoir réaliser ce travail, nous nous sommes basés sur les travaux de Bacchi (Bacchi, 2000) dont l'objet était de caractériser et de hiérarchiser les différents habitats aquatiques de la Loire moyenne.

Sommaire

Introduction	4
I^{ère} partie Présentation méthodologique	6
2. Analyse des habitats aquatiques : problématique	7
3. Caractérisation de la structure des peuplements des sites de référence	17
4. La modélisation de l'écosystème ligérien : Principe et méthode	24
II^{ème} partie Analyse du site d'Ingrandes	29
1. Présentation du site	30
2. Approche comparée du site d'Ingrandes avec d'autres sites de Loire	37
3. Modélisation biologique à l'étiage des différents sites	41
4. Analyse comparée du site d'Ingrandes avant et après travaux	49
Conclusion	60

Introduction

1.1. Présentation

Bien que considéré comme l'un des outils les plus utilisés et les plus pertinents pour définir les types des systèmes d'eau courante et apprécier l'état de santé des eaux douces, les invertébrés benthiques n'ont été que très peu étudiés sur la Loire.

Pourtant, loin de n'être qu'un complément à l'analyse du milieu, l'étude des communautés macrobenthiques, en rendant possible l'évaluation des altérations des systèmes aquatiques suivant le principe général de causalité (Verneaux, 1973), permet la caractérisation d'un **milieu aquatique** et l'évaluation des altérations de celui-ci.

Différentes approches ont été retenues pour étudier la macrofaune benthique dans le cadre de l'étude de l'hydrosystème ligérien (Bacchi, 2000) :

- ⇒ la première pour caractériser les peuplements macrobenthiques sur l'ensemble de l'axe ligérien et pour établir une distribution typologique.
- ⇒ la deuxième approche pour déterminer et hiérarchiser les principaux paramètres influant les biocénoses en place. Cette étude des co-structures entre faune benthique et facteurs de distribution en milieu ligérien a été plus particulièrement conduite sur le site de Bréhémont en deux temps :
 - dans un premier temps, pour décrire l'influence respective **des facteurs de macro-distribution** dans les différentes stations de ce site (lit vif et annexes hydrauliques), et pour vérifier la dynamique spatiale et temporelle décrite par de nombreux auteurs sur d'autres hydrosystèmes (Bournaud & al., 1981, 1996 ; Franquet, 1995...).
 - dans un deuxième temps pour décrire **les facteurs de micro-distribution** (substrat/vitesse en particulier) à l'échelle du site ou de la station, évoqués par de nombreux auteurs (Thienemann, 1912 ; Shelford, 1913 ; Behning, 1928 ; Muttkowsky, 1929 ; Gerbacher, 1937 ; Illies & Botosaneanu, 1963...).

Ce travail a permis d'envisager certaines retombées pratiques comme la mise au point de protocoles d'échantillonnage.

Mais cette approche permet aussi et surtout de déterminer les impacts de modifications apportées à l'hydrosystème (mise en place d'enrochement, suppression d'île, mise en place de seuils et de barrages...) grâce à la caractérisation des principales structures d'habitat ligériennes. En effet, la caractérisation des couples substrat-vitesse en fonction de variables faunistiques décrivant les peuplements en place (nature de la faune présente, variété/diversité du peuplement, abondance des taxons) permet, si les principaux habitats présents (couples substrat-vitesse) ont été identifiés quantitativement au moyen d'une technique cartographique adaptée aux grands cours d'eau, d'attribuer sur un espace géographique particulier un score caractéristique d'une situation donnée. Le score est obtenu par la mise en relation de la surface occupée par un couple substrat-vitesse avec les variables faunistiques caractéristiques des peuplements en place (nature, abondance, variété/diversité...).

L'intérêt de cette modélisation réside dans le fait que toute intervention physique sur l'hydrosystème peut être analysée en dehors de toutes autres considérations (perturbations hydrauliques, physico-chimiques...) et sans étude de la macrofaune benthique in situ.

Pour être valide, ce travail nécessite une approche en deux phases :

- ⇒ dans un premier temps, il s'agit de formaliser la méthode et la finaliser en proposant et expliquant la méthode de modélisation des résultats faunistiques obtenus (détermination des variables faunistiques pour chaque paramètre déterminant et présentation sous forme graphique simple), et en décrivant une méthode simple de cartographie des habitats qui puisse permettre une comparaison synchronique et/ou diachronique des résultats. C'est ce travail qui est présenté dans la première partie de ce document.

- ⇒ dans une deuxième phase, cette modélisation a été mise en œuvre sur le site pilote de Ingrandes pour tester cette méthode et évaluer les impacts prévisibles de différents scénarii d'aménagement sur le milieu naturel. Les résultats seront bien sûr discutés et comparés avec des résultats obtenus sur d'autres sites de Loire et une approche critique de la méthode pourra alors être envisagée. Ce travail est présenté dans la deuxième partie de ce document.

I^{ère} partie
Présentation méthodologique

Table des Matières

1.1. Présentation.....	4
2. Analyse des habitats aquatiques : problématique.....	7
2.1. Rappels et définitions	7
2.1.1. Les facteurs de macro-distribution.....	7
2.1.2. Les facteurs de micro-distribution	8
2.2. Les habitats aquatiques sur deux sites référence : La –Charité-Sur-Loire et Bréhémont 9	9
2.2.1. Présentation des sites de référence.....	9
2.3. Distribution faunistique en fonction de facteur de macro-distribution.....	11
2.3.1. Distribution spatiale et temporelle de la macrofaune benthique	11
2.3.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents types de milieux rencontrés.....	12
2.3.3. Analyse de la disparité stationnelle dans le lit vif.....	12
2.4. Distribution faunistique en fonction de facteur de micro-distribution.....	13
2.4.1. Analyse de la richesse taxinomique par type de substrat.....	13
2.4.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents substrats analysés	14
2.4.3. Analyse du peuplement en fonction des substrats et des vitesses de courant	15
3. Caractérisation de la structure des peuplements des sites de référence.....	17
3.1. Les peuplements en fonction des facteurs de macro-distribution.....	17
3.2. Les peuplements en fonction des facteurs de micro-distribution.....	18
3.2.1. Analyse de l'abondance, de la richesse taxinomique, de la diversité de Shannon et de l'équitabilité pour chaque type d'habitat	18
3.2.2. Analyse de la variété taxinomique moyenne des différentes populations ligériennes.....	20
4. La modélisation de l'écosystème ligérien : Principe et méthode.....	24
4.1. Les variables analysées.....	24
4.1.1. Les facteurs de macro-distribution.....	24
4.1.2. Les facteurs de micro-distribution	24
4.1.3. Les groupes faunistiques	24
4.1.4. Les variables faunistiques analysées.....	24
4.2. Méthodologie	25
4.2.1. Méthode de calcul des surfaces et mode de représentation cartographique.....	25
4.2.2. Détermination de la valeur biologique potentielle des sites	27

2. Analyse des habitats aquatiques : problématique

2.1. Rappels et définitions

2.1.1. Les facteurs de macro-distribution

On distingue sur la Loire de nombreuses unités géomorphologiques différentes.

Avant de commencer cette étude, il paraît nécessaire de préciser quelques termes du vocabulaire qui sera utilisé par la suite. En effet, comme c'est souvent le cas pour de nombreux systèmes potamiques, les différentes unités structurales sont souvent décrites à l'aide d'une terminologie locale et des noms vernaculaires propres à un hydrosystème particulier. Afin d'éviter toute ambiguïté, nous reprenons ici les principaux termes utilisés (fig. 1) pour les rattacher à des terminologies plus générales (Amoros & al, 1987).

- **Le lit mineur ou lit apparent ou lit vif.** C'est la partie de l'hydrosystème qui ne s'assèche jamais ; on y distingue deux unités différentes : le chenal principal, section où transitent plus des deux tiers du débit, et les chenaux secondaires où transite moins d'un tiers du débit.

- **Les bras morts** : annexes hydrauliques alimentées en période de hautes eaux (eaux courantes) mais déconnectées du système principal, soit totalement, soit par l'amont ou très rarement par l'aval en période estivale. Si les sédiments de ces bras morts sont relativement grossiers (sables, graviers, ...) et susceptibles d'être remobilisés localement lors de la reconnexion avec le lit principal, **les processus généraux de sédimentation vont dans le sens de la fermeture du bras** (hors événements exceptionnels comme une crue centennale). Ces bras correspondent au parapotamon (toujours en connexion avec le fleuve) et au pleisiopotamon (communication avec le fleuve en période de crue) décrits par Amoros & al., (1982) et Amoros, (1987).

- **Les boires** : annexes hydrauliques déconnectées complètement du lit principal (en général pour des débits supérieurs au module). Elles sont alimentées uniquement par la nappe alluviale sauf lors de crues importantes qui permettent, de façon très épisodique, une arrivée d'eau par l'aval. Les processus sédimentaires sont essentiellement liés à des dépôts de sédiments fins. En l'absence de connexion amont, une dynamique sédimentaire d'eau courante n'y est, en général, pas possible. Les groupements végétaux qui s'implantent dans ces systèmes sont ceux que l'on retrouve sur les sédiments très fins à dominante organique (type *Bidention*), et les diverses communautés d'hélophytes et d'hydrophytes. Ces systèmes de boire se rattachent au paléopotamon.

- **Les îles** : atterrissements isolés de l'eau en période estivale mais dont les berges ont une hauteur comparable à celles de la plaine d'inondation (lit majeur). Cela rend possible l'implantation d'une végétation typique du lit majeur dont les forêts de bois durs ou mixtes (bois tendre / bois durs). L'exondation durable permet la formation d'un sol jeune ; le remaniement sédimentaire est difficile et s'effectue par érosion latérale ou frontale lente.

- **Les atterrissements** : Ce sont les barres sédimentaires des sédimentologues (Reineck & al., 1980) décrites sur la Loire par des auteurs comme Brossé, (1982). Très fortement remaniées en période hivernale, aucun sol ne s'y développe. Seule une végétation composée de thérophytes peut s'y implanter en période estivale. On y observe notamment les groupements des sables exondés comme le *Nanocyperion*, le *Chenopodion rubri* et le *Bidention tripartiti*.

- **Les atterrissements végétalisés** : ils correspondent aux barres sédimentaires précédentes dont la stabilité est rendue possible par l'implantation d'une végétation ligneuse pionnière. La hauteur de ces dépôts sédimentaires est bien inférieure à celle de la berge du lit principal. Seule une végétation typique du lit mineur peut s'y implanter comme la jeune *Saulaie* *Peupleraie* susceptible d'évoluer vers des *Saulaies-Peupleraies* arborescentes, puis par exhaussements successifs vers la communauté forestière des îles : la forêt de bois dur.

- **Les ouvrages de navigation** ; on distingue les digues qui définissent le lit endigué, les épis placés dans le lit de la Loire perpendiculairement au sens d'écoulement normal des eaux, des duits et des chevrettes placés dans le lit de la Loire parallèlement ou en diagonal par rapport au sens d'écoulement normal des eaux. Les enrochements en berge sont des ouvrages destinés à protéger les berges de l'érosion. Ils sont en général constitués par la mise en place sur les berges de gros blocs rocheux. Ils mettent en général beaucoup de temps pour se végétaliser. Les espèces végétales qui peuvent s'implanter sur ces ouvrages sont très souvent des héliophytes (du genre *Carex* par exemple) ou bien alors des saules ou des peupliers.

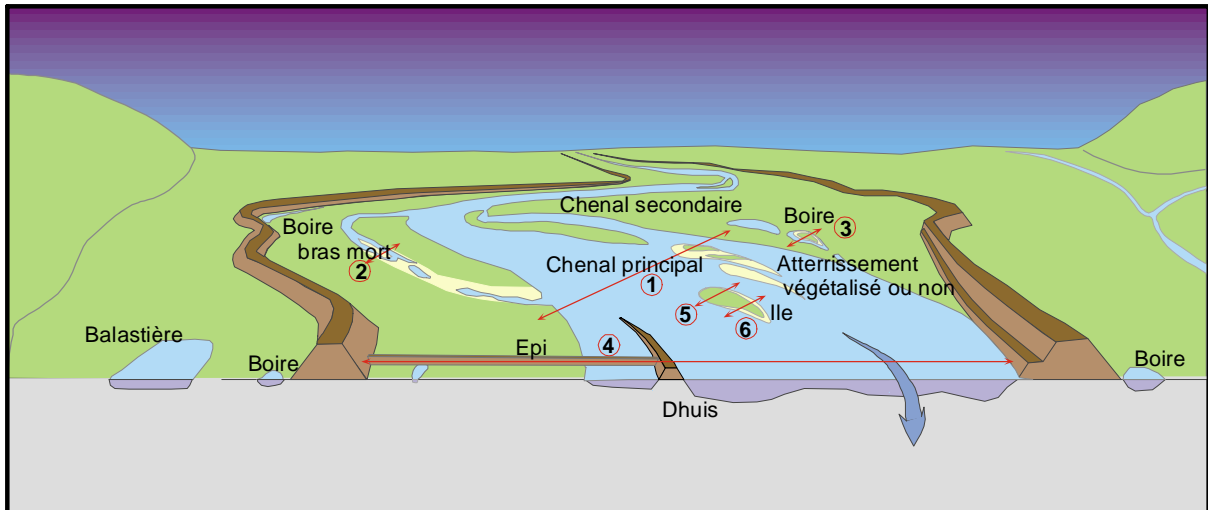


Fig. 1 : Présentation schématique d'un site de Loire

2.1.2. Les facteurs de micro-distribution

Si la répartition des taxons est très dépendante des facteurs de macro-distribution qui expliquent la répartition longitudinale ou latérale des différentes espèces sur un hydrosystème considéré dans sa globalité, la position des taxons, à l'échelle stationnelle, est davantage liée à l'influence des facteurs de micro-distribution. Ceux-ci caractérisent tous les facteurs qui interfèrent de façon plus ou moins forte dans la structuration de « l'habitat » de chaque espèce.

Si de nombreux paramètres sont susceptibles d'intervenir, il a pu être démontré, sur la Loire moyenne, le rôle prépondérant joué par la nature du substrat et la vitesse de courant pour les peuplements.

Le tableau I ci-dessous présente ces différents substrats.

Type de substrat	Caractéristiques
Substrats végétaux	
Algues filamenteuses	-
Racines	Chevelu dense
Végétaux émergents	Hélophytes ou végétaux terrestres à moitié immergés
Végétaux immergés	Hydrophytes ou végétaux submergés
Bois	Troncs d'arbres ou branches immergés
Substrat fin à dominante organique ('vases')	
Déchets organiques	Feuilles, brindilles
Substrats minéraux	
Sables	Diamètre < 2 mm
Graviers	2 mm – 3 cm
Galets	3 cm – 15 cm
Blocs	Diamètre > 15 cm
Graviers-galets	2 mm – 15 cm
Sables-graviers	< 3 cm
Sables-graviers-galets	< 15 cm

Tableau I : Les différents types de substrats : principales caractéristiques

2.2. Les habitats aquatiques sur deux sites référence : La – Charité-Sur-Loire et Bréhémont

2.2.1. Présentation des sites de référence

Les deux sites retenus comme sites de référence sont les sites de la Charité-sur-Loire et de Bréhémont (fig. 2). Ces sites ont été choisis car bien que distants de près de 300 Km, ils ont l'avantage de présenter des caractéristiques morphologiques et fonctionnelles similaires.

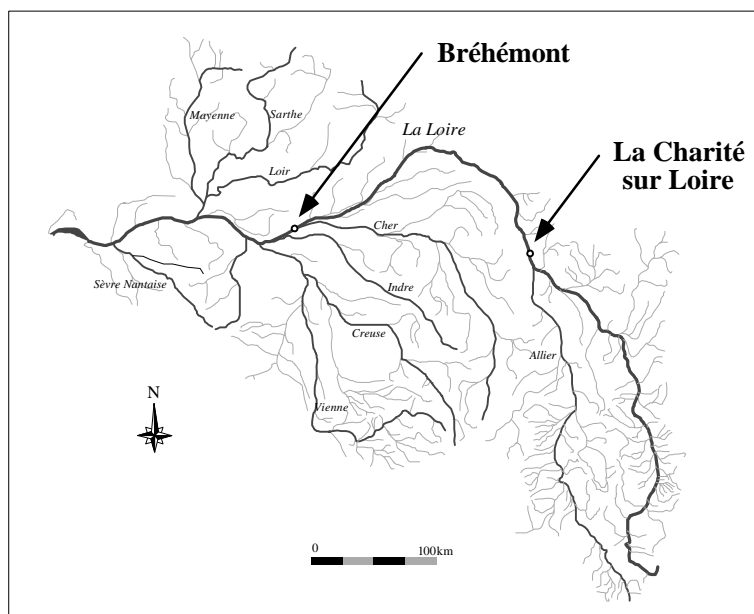


Fig. 2 : Localisation des sites de La-Charité-Sur-Loire et Bréhémont dans le bassin versant de la Loire

Les deux sites ont été utilisés par Bacchi (Bacchi, 2000) pour étudier la structure et la dynamique des peuplements macrobenthiques en Loire.

2.2.1.a Caractéristiques des sites

Les principales caractéristiques des sites sont données dans le tableau II ci-dessous :

	La Charité-sur-Loire	Bréhémont
Distance à la source	470 Km	761 Km
Pente moyenne du lit	0,53 m/Km	0,42 m/Km
Altitude	161 mètres	35 mètres
Largeur moyenne du chenal principal à l'étiage	180 mètres	260 mètres
Classe de qualité des eaux (Agence de l'eau Loire Bretagne (1994))	2	3

Tableau II : Principales caractéristiques des sites de Loire analysés

2.2.1.b Caractéristiques des peuplements

Le tableau III présente les différentes caractéristiques des peuplements de la macrofaune benthique des sites de La-Charité-sur-Loire et Bréhémont qui serviront de référence lors de cette étude.

	La Charité	Bréhémont	Total
Nombre d'échantillons	204	738	942
Abondance totale	176 588	705 578	882 166
Pourcentage d'Oligochètes et de Chironomidés	56,5%	77%	-
Abondance moyenne par prélèvement	866	956	936
Abondance moyenne des taxons autres que Oligochètes et Chironomidés (% de l'abondance totale)	377 (43,5%)	221 (23,11%)	
Nombre. de taxons (genre-famille)	93	136	-
Nombre. d'espèces identifiées	-	59	-
Nombre. d'espèces de nymphes de Chironomidés	58	84	-

Tableau III : Principales caractéristiques du cortège faunistique recensé sur les site de La-Charité-sur-Loire et Bréhémont en 1996.

Les peuplements des deux sites se caractérisent par le nombre très important d'Oligochètes et de Diptères Chironomidés. Ceux-ci représentent respectivement 56,5% et 77% du nombre total d'individus échantillonnés. L'abondance moyenne par prélèvement (936 individus pour 1/20ème de m²) qui peut apparaître comme un peu faible par rapport aux résultats que l'on obtient avec un échantillonnage stratifié utilisé par des prélèvements de type IBGN, est due au fait que tous les habitats ont été prospectés systématiquement, y compris ceux qui étaient les moins susceptibles d'héberger une faune abondante et diversifiée.

Le nombre total de taxons (genre-famille) est élevé sur les deux sites puisque l'on en recense 93 à La-Charité-sur-Loire et 136 à Bréhémont.

2.3. Distribution faunistique en fonction de facteur de macro-distribution

2.3.1. Distribution spatiale et temporelle de la macrofaune benthique

La fig. 3 et tableau IV illustre la distribution spatiale et temporelle des peuplements macrobenthiques sur les deux sites. D'une façon générale, les taxons du lit vif ne représentent qu'une partie du peuplement (67,7 % sur la Charité et 72,8 % sur Bréhémont). Les annexes hydrauliques peuvent accueillir un pourcentage élevé de taxons (respectivement 95,7 % et 89,0 %). Ces fortes valeurs s'expliquent par les caractéristiques particulières de ces milieux qui hébergent des taxons spécifiques que l'on ne retrouve pas dans le lit vif (29 sur la Charité et 37 sur Bréhémont). De plus, après des crues importantes, de nombreux taxons du lit vif dérivent dans ces bras et participent à l'augmentation de la biodiversité observée.

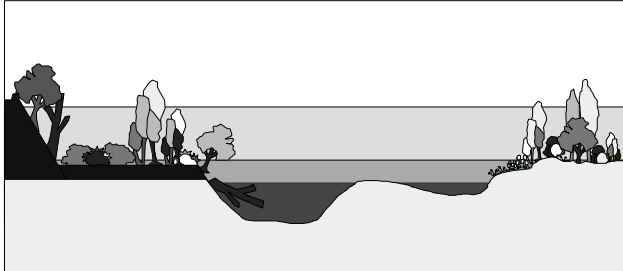

Site de La Charité sur Loire: Nombre total d'unité taxinomiques (genre/familles) 93			
Nombre de taxons échantillonnés dans le lit vif	63 (67,7%)	Nombre de taxons échantillonnés dans les annexes	89 (95,7%)
Nombre de taxons spécifiques au lit vif	3 (3,2%)	Nombre de taxons spécifiques aux annexes.	29 (31,2%)
			
Nombre de taxons échantillonnés dans le lit vif	99 (72,8%)	Nombre de taxons échantillonnés dans les annexes	121 (89,0%)
Nombre de taxons spécifiques au lit vif	13 (9,5%)	Nombre de taxons spécifiques aux annexes	37 (27,2%)
Site de Bréhémont: Nombre total d'unité taxinomiques (genre/familles) 136			

Fig. 3 : Répartition de la macrofaune benthique sur deux sites de Loire en fonction des facteurs de macro-distribution

2.3.1.a Evolution de la variété

Sur les deux sites, les plus fortes variétés faunistiques sont enregistrées en période printanière avec un maximum observé durant les mois de mai et juin. La diversité taxinomique des annexes hydrauliques apparaît (sauf pour les mois de septembre et octobre à Bréhémont) supérieure à celle du lit vif.

2.3.1.b Evolution de l'abondance

Le calcul de l'abondance moyenne par prélèvement montre une nette différence entre les sites de Bréhémont et de La-Charité-sur-Loire : les valeurs de ce paramètre sont fortes pour les prélèvements du lit vif sur le site de Bréhémont (valeurs doubles de celles des annexes hydrauliques). Ce phénomène n'est pas observé à La-Charité-sur-Loire où les abondances dans les bras sont nettement supérieures à celles du chenal principal.

2.3.1.c Evolution temporelle du nombre de taxons spécifiques aux stations échantillonnées (lit vif-annexes hydrauliques)

A Bréhémont, le nombre de taxons spécifiques, que l'on ne retrouve que dans un seul des systèmes hydrauliques, est maximum en mai-juin dans les annexes hydrauliques et, en juillet-août dans le lit vif. Par contre, on observe une structure très différente sur le site

de la Charité puisque, durant la période analysée, les annexes hydrauliques abritent toujours un nombre important de taxons spécifiques alors que le lit vif en est à peu près dépourvu.

2.3.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents types de milieux rencontrés.

Cette analyse a été conduite sur les deux sites analysés ensemble (Nombre total de taxons inventorié ; 142). On trouve les valeurs suivantes :

	Nb. total de taxons	% du nombre total	Nb. taxons spécifiques	% Taxons spécifiques/ nb. total de taxons spécifiques
Lit vif	119	83,80%	10	37,04%
Bras mort	126	88,73%	16	59,26%
Boire	89	62,68%	1	3,70%

Tableau IV : Analyse conjointe des sites de la Charité sur Loire et Bréhémont. Nombre de taxons et nombre de taxons spécifiques par type de milieu.

2.3.3. Analyse de la disparité stationnelle dans le lit vif

Dans chaque site, la variété et l'abondance des taxons est sujette à une forte variabilité stationnelle. En effet, la variété moyenne des taxons échantillonnés au centre du chenal principal (fig. 4) est toujours très largement inférieure à celle des berges. La diversité moyenne de Shannon (notée H') par prélèvement et l'équitabilité sont aussi très inférieures (fig. 4 et tableau V).

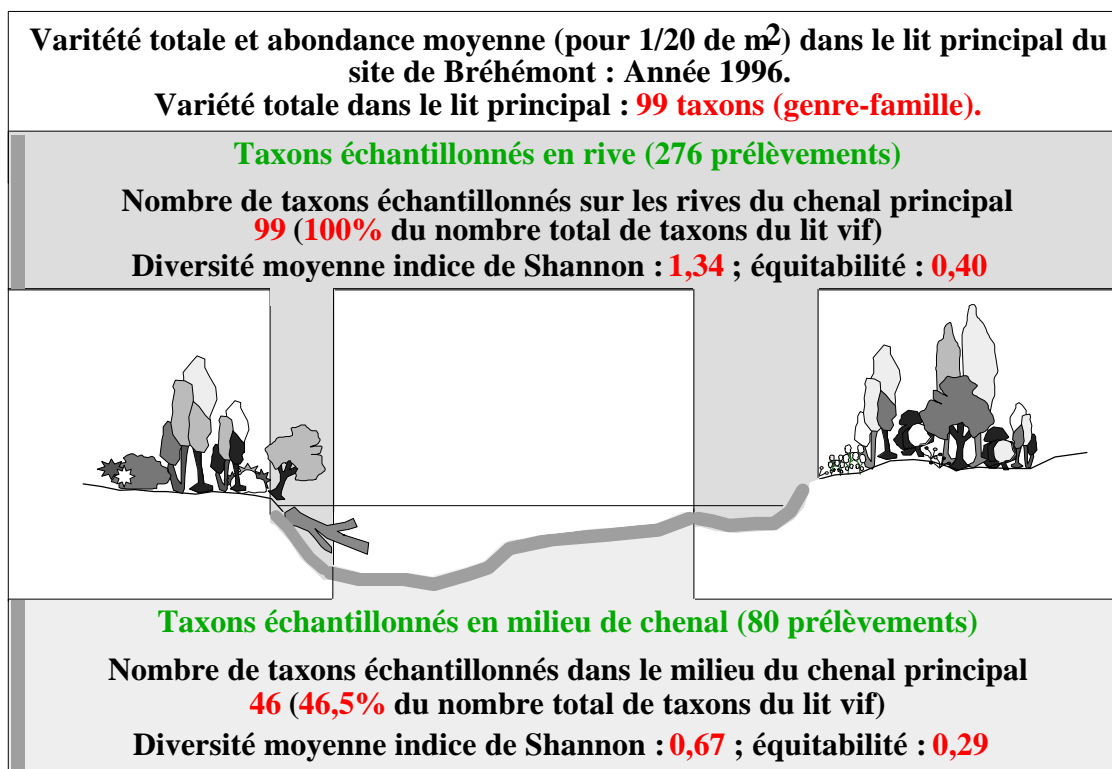


Fig. 4 : Répartition taxinomique sur les berges et au centre du lit vif sur le site de Bréhémont au cours de l'année 1996

	Centre du chenal principal	Berges du chenal principal
Diversité de Shannon	0,67	1,34
Équitabilité	0,29	0,40

Tableau V : Diversité de Shannon et équitabilité moyenne par prélèvement, relevées sur les sites de Bréhémont et de La-Charité-sur-Loire au cours de l'année 1996.

Ces résultats confirment ceux trouvés sur le Mississippi par Anderson (1986). Toutefois, contrairement aux résultats de cet auteur, l'abondance moyenne au milieu du lit vif est similaire à celle des berges du lit principal. Ceci est essentiellement dû au nombre très important d'Oligochètes qui prolifèrent dans le lit vif, alors que sur les berges ce sont les Diptères Chironomidés qui dominent le peuplement. Cette différence s'explique par la nature du fond du chenal, presque exclusivement constitué de sable, qui ne permet pas l'implantation d'une faune variée (Peeters, 1989), alors que ce type de milieu convient tout à fait aux Oligochètes. D'une façon générale, (fig. 4) la variété taxinomique en rive (99 taxons pour 276 prélèvements) est très supérieure à celle du milieu de chenal (46 taxons pour 80 prélèvements).

2.4. Distribution faunistique en fonction de facteur de micro-distribution

La relation taxon/substrat a déjà fait l'objet de très nombreux travaux sur les cours d'eau. Outre des articles très généraux (Cummins & Lauff, 1969 ; Hynes, 1970 ; Prodon, 1976), la bibliographie est riche d'un très grand nombre de travaux qui font référence à l'utilisation des substrats par différentes communautés macrobenthiques en petits ou grands cours d'eau (auct. in Coggerino, 1989 ; Beisel, 1996).

L'hydrosystème ligérien présentant de nombreuses originalités, il paraît important de préciser ici l'utilisation des différents habitats par les invertébrés aquatiques.

2.4.1. Analyse de la richesse taxinomique par type de substrat

La fig. 5 illustre, pour le site de Bréhémont, la distribution des différents taxons dans les substrats. Le nombre de prélèvements par substrat étant très variable, les données sont présentées sous forme de courbes de richesse cumulée calculées à partir d'un ré-échantillonnage aléatoire dans l'ensemble des relevés (Ferry et Frochot, 1970 ; Chessel, 1993). Cette technique permet de comparer, pour un même nombre d'échantillons, la variété taxinomique et rend aussi possible l'évaluation de la stabilité de l'échantillonnage.

On remarque que la richesse taxinomique augmente naturellement avec le nombre de prélèvements. La richesse est maximum pour les racines d'arbres, les végétaux émergents et immergés, les bois et les blocs, et est bien moindre pour les autres substrats : sables, graviers ou galets mélangés ou non aux substrats de plus faible granularité. Cette différence s'explique par une plus grande complexité spatiale qui offre de très nombreux abris, et par la relative stabilité des substrats végétaux de bordure qui permet, même lors de contraintes hydrauliques fortes, la présence d'un cortège faunistique.

La richesse spécifique évolue peu, pour un même substrat, en fonction de la vitesse du courant. Mis à part pour certains substrats fortement mobiles comme les débris organiques, les limons fins, très riches en matières organiques (« vases ») et les sables, la capacité d'accueil de chaque substrat apparaît relativement constante quelle que soit la classe de vitesse analysée. Bien sûr les taxons présents sont nécessairement différents suivant les conditions de l'écoulement sur chaque habitat.

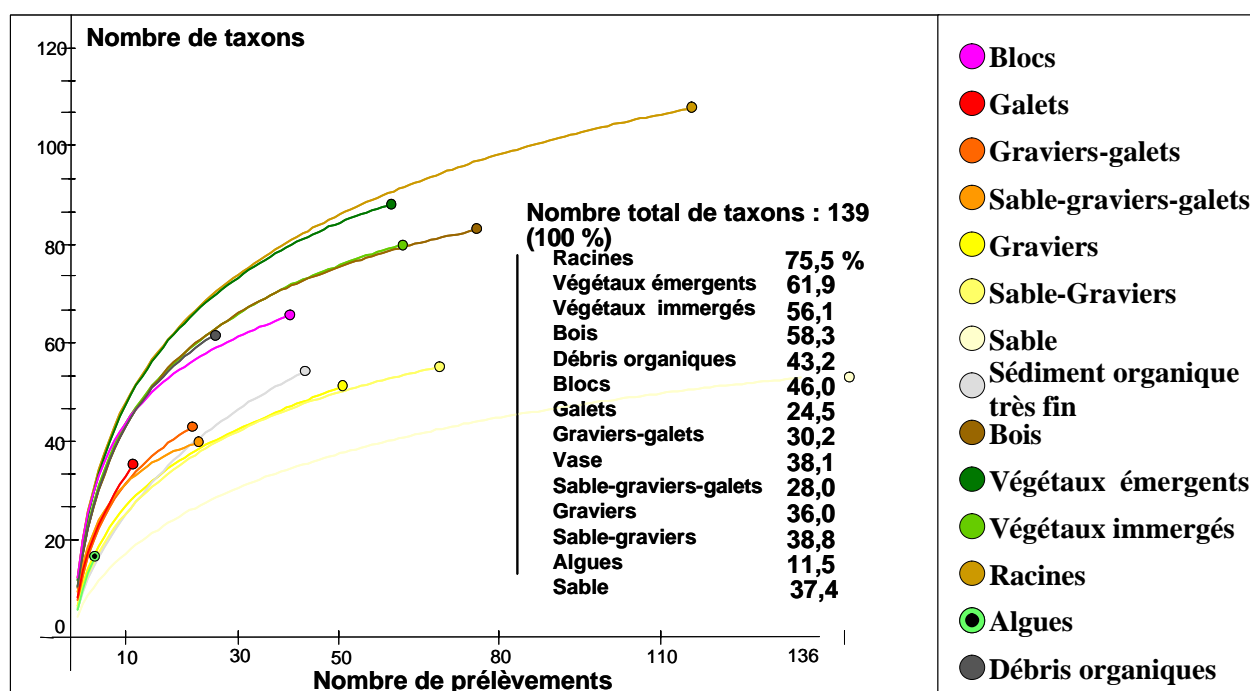


Fig. 5 courbes des richesses cumulées des substrats analysés sur le site de Bréhémont en Indre et Loire en 1996

Outre ces deux facteurs, la richesse taxinomique est aussi influencée par les apports trophiques des substrats organiques qui sont directement ou indirectement (ingestion de micro-organismes) liés à la dégradation de la matière organique allochtone comme les bactéries ou les champignons (Iversen, 1974 ; Lapchin, 1977 ; Becker 1994). Cela explique le nombre important de taxons recensés dans les débris organiques et dans les sédiments minéraux très fins riches en matière organique (« vases »).

Ces résultats ne correspondent pas aux travaux de Cogérino (1989) sur le Rhône. En effet, les substrats racines (petites, grosses et chevelu) et hélrophytes qui apparaissent très importants en Loire car porteurs d'une très forte biodiversité, présentent sur le Rhône une richesse relative très moyenne et bien inférieure aux bryophytes, algues, blocs et débris organiques (les valeurs de richesse et d'abondance brutes ne peuvent être discutées en l'absence d'un protocole unique d'échantillonnage qui ne permet pas de conclure). Cela souligne les fortes disparités qui existent entre les hydrosystèmes fluviaux et l'impossibilité de généraliser les résultats obtenus.

Il est à noter que ce travail a été aussi réalisé sur le site de La-Charité-Sur-Loire avec des résultats tout à fait comparables.

2.4.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents substrats analysés

Cette analyse a été conduite sur les deux sites analysés ensemble (Nombre total de taxons inventorié ; 142). On trouve les valeurs suivantes :

	Nb. total de taxons	% du nombre total	Nb. taxons spécifiques	% Taxons spécifiques/ nb. total de taxons spécifiques
Algue, racines, Spermaphytes. (émergents et immergés), Débris organiques	128	90,14%	21	63,64%
Bois	92	64,79%	2	6,06%
Vase et sable	79	55,63%	6	18,18%
Gravier et Sable/gravier	71	50,00%	1	3,03%
Galets, Graviers/galets, sables/graviers/galets	67	47,18%	0	0,00%
Blocs	78	54,93%	3	9,09%

Tableau VI : Analyse conjointe des sites de la Charité sur Loire et Bréhémont. Nombre de taxons et nombre de taxons spécifiques par type de substrat.

2.4.3. Analyse du peuplement en fonction des substrats et des vitesses de courant

La fig. 6 résume les principales informations recueillies pour chaque substrat et pour chaque classe de vitesse à Bréhémont et à La-Charité-sur-Loire. On y remarque globalement, par type d'habitat, des valeurs plus élevées de variété, de diversité et d'équitabilité sur le site de la Charité sur Loire qu'à Bréhémont même si la variété totale échantillonnée (tous prélèvements confondus) est plus faible sur le premier à cause du moindre nombre de prélèvements réalisés. En revanche, l'abondance moyenne par prélèvement est, sauf cas particulier, plus importante sur le site de Bréhémont.

Pour beaucoup de substrats, les valeurs maximales des différents indices sont observées pour des vitesses faibles (moins de 0,2 m/s) ou moyennes (entre 0,2 et 0,8 m/s). C'est particulièrement vrai pour la variété totale toujours très importante pour des vitesses inférieures à 0,2 m/s, ainsi que pour le nombre de taxons spécifiques toujours très limité dès que les vitesses de courant augmentent. Ces résultats montrent l'intérêt de la prospection des zones lénitiques de bordure pour l'obtention d'un échantillon le plus complet possible.

Substrat	Classe de vitesse	Bréhémont									La Charité sur Loire								
		Nombre de prélèvements	abondance moyenne par prélèvement	Variété moyenne par prélèvement	Diversité de Shannon moyenne	Diversité maximale observée	Équitabilité moyenne	variété maximale par prélèvement	variété totale du couple substrat-vitesse.	Nombre de taxons spécifiques d'une classe de vitesse	Nombre de prélèvements	abondance moyenne par prélèvement	Variété moyenne par prélèvement	Diversité de Shannon moyenne	Diversité maximale observée	Équitabilité moyenne	variété maximale par prélèvement	variété totale du couple substrat-vitesse.	Nombre de taxons spécifiques d'une classe de vitesse
Algues	V1	4	168	6,25	1,23	2,02	0,46	10	16	-									
Racines	V1	99	1162	12,90	1,51	3,09	0,42	23	101	62	25	1743	17,76	1,72	2,61	0,43	27	65	43
	V2	14	3307	10,86	1,13	1,97	0,33	18	42	4	1	250	23,00	3,61	3,61	0,80	23	24	2
	V3	1	816	8,00	0,61	0,61	0,20	8	8	0									
Végétaux émergents	V1	56	870	12,29	1,35	3,42	0,38	23	86	76	18	775	15,33	1,55	2,40	0,41	24	60	50
	V2	3	175	5,67	0,77	1,18	0,32	7	10	0	1	789	9,00	0,72	0,72	0,23	9	10	0
Végétaux immergés	V1	52	854	10,87	1,21	2,31	0,38	22	77	41	9	733	15,78	1,45	2,53	0,36	22	54	27
	V2	8	1631	11,38	1,39	2,07	0,43	19	37	1	7	6683	12,29	1,09	1,78	0,29	19	29	2
	V3	1	6868	10,00	0,42	0,42	0,13	10	10	0									
Bois	V1	64	454	10,94	1,65	3,14	0,49	24	80	52	23	317	13,61	1,94	3,23	0,51	20	60	29
	V2	9	1529	9,00	1,71	2,29	0,56	14	27	0	7	742	14,43	1,98	3,10	0,51	23	34	3
	V3	2	1186	8,00	1,50	2,02	0,52	9	13	1	1	135	9,00	1,04	1,04	0,33	9	10	1
Vase	V1	43	553	6,28	1,16	2,87	0,46	12	53	-	4	556	5,75	0,92	1,16	0,37	7	12	-
Sable	V1	84	378	5,27	1,04	2,26	0,46	10	45	26	19	174	7,68	1,61	2,75	0,56	12	36	25
	V2	14	1319	4,14	0,82	2,79	0,35	9	17	0	6	102	4,83	1,30	2,23	0,59	7	12	2
	V3	35	1256	3,94	0,61	2,01	0,31	13	22	5	5	29	3,80	1,44	1,75	0,76	5	8	0
Gravier	V1	24	467	6,38	1,05	2,22	0,41	15	38	18	10	835	9,20	1,25	2,00	0,42	13	30	12
	V2	19	1414	8,47	0,94	1,98	0,35	15	32	8	2	666	12,00	1,92	2,53	0,54	13	18	0
	V3	6	492	5,50	0,91	1,84	0,40	16	16	0	4	137	6,00	1,60	2,01	0,66	9	13	2
Galets	V1	10	581	8,60	1,27	2,48	0,42	17	34	25	10	844	13,90	1,13	1,72	0,30	17	39	13
	V2	1	574	8,00	1,95	1,95	0,65	8	8	0	6	351	11,33	1,99	2,75	0,60	17	30	2
	V3										2	247	8,00	2,22	2,35	0,76	10	12	0
Blocs	V1	21	347	11,57	1,93	3,00	0,56	20	54	17	16	278	14,56	2,12	3,00	0,55	22	43	20
	V2	17	1406	14,71	1,65	2,89	0,42	21	47	8	5	1139	12,00	1,90	2,55	0,52	15	28	6
	V3	2	1233	9,50	1,18	1,49	0,36	11	12	0	2	46	5,00	1,10	1,39	0,50	7	10	1
Graviers-galets	V1	13	807	7,92	1,01	2,41	0,39	17	32	11									
V2	8	829	9,00	1,19	2,45	0,38	16	31	10										
Sable-graviers	V1	25	502	6,40	1,15	2,24	0,46	14	40	9	8	1098	9,75	1,28	2,39	0,38	12	28	14
	V2	25	1521	8,08	0,84	1,71	0,31	18	42	11	2	481	10,50	1,64	2,38	0,58	15	17	3
	V3	17	2409	5,29	0,47	1,30	0,20	12	22	1									
Sable-graviers-galets	V1	11	870	9,45	0,98	1,71	0,30	16	34	8	2	507	12,00	1,60	2,12	0,47	15	16	3
	V2	9	1436	10,11	0,93	1,70	0,28	15	29	3	2	252	9,50	1,12	1,63	0,34	11	14	3
	V3	3	1158	9,67	1,49	1,70	0,47	14	17	1	1	94	9,00	2,43	2,43	0,77	9	10	1
débris organiques	V1	24	755	10,71	1,41	2,40	0,42	19	57	41	2	826	14,00	1,61	1,71	0,42	16	21	-
	V2	2	684	11,50	0,93	0,99	0,30	17	19	3									

(V1, classe de vitesse 1 ; V2 classe de vitesse 2 ; V3 classe de vitesse 3)

Fig. 6 : Présentation de différents indices (abondance, variété, diversité, équitabilité, taxons spécifiques) caractérisant les couples substrat-vitesse sur les sites de Bréhémont et de la Charité sur Loire (toutes stations confondues).

3. Caractérisation de la structure des peuplements des sites de référence

3.1. Les peuplements en fonction des facteurs de macro-distribution

Cette analyse (fig. 7) fait ressortir au niveau du lit vif, des bras morts et des boires les éléments suivants :

- ⇒ des valeurs maximales de richesse taxinomique, de diversité (Shannon) et d'équitabilité dans les bras morts et des valeurs minimales dans le lit vif ;
- ⇒ une abondance globale très faible dans les boires et les bras morts, mais très importante dans le lit principal.

Au niveau des populations (fig. 8), on remarque :

- ⇒ l'affinité des Epheméroptères et surtout des Trichoptères pour le lit vif ;
- ⇒ la préférence marquée des Odonates et des Coléoptères pour les boires et les bras morts.

Le nombre de données limitées de relevés présentant des Plécoptères ne permet pas de tirer des conclusions quant à leur préférence notée pour les boires.

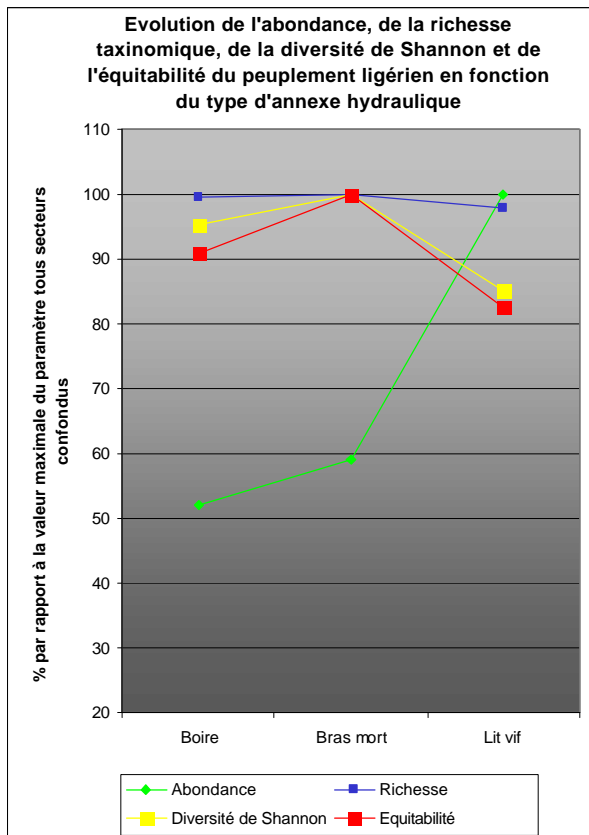


Fig. 7 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité dans le lit vif, les bras morts et les boires. dans le lit vif les bras morts et les boires

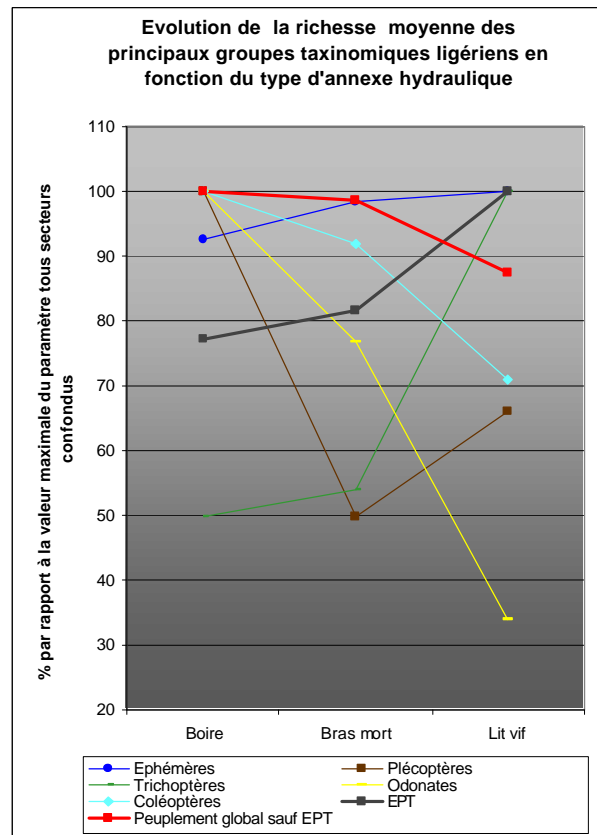


Fig. 8 Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques dans le lit vif les bras morts et les boires

3.2. Les peuplements en fonction des facteurs de micro-distribution

3.2.1. Analyse de l'abondance, de la richesse taxinomique, de la diversité de Shannon et de l'équitabilité pour chaque type d'habitat

Les principaux paramètres permettant de caractériser des peuplements sont analysés pour chaque type de substrat mais aussi en fonction de la vitesse de courant. Les analyses suivantes présentent les principaux résultats obtenus toutes stations confondues sur les deux sites analysés.

3.2.1.a Analyse selon la nature du substrat

L'analyse de la variété taxinomique moyenne par substrat (fig. 9) nous permet de faire les observations suivantes :

Abondance : elle est maximale pour les substrats végétaux immergés et les racines.

Richesse taxinomique : elle est en générale forte pour les substrats organiques à l'exception des algues. Elle présente aussi de plus faibles valeurs pour les substrats minéraux. On note toutefois une augmentation de la richesse avec la grosseur granulométrique du sédiment.

Diversité de Shannon : cet indice prend des valeurs maximales suivant le degré de stabilité du substrat. Il est ainsi maximum pour les racines et les bois mais aussi pour les galets et les blocs.

Équitabilité : cet indice suit en général l'indice de Shannon. On remarque toutefois des discordances importantes pour les substrats algues, vases et débris organiques.

3.2.1.b Analyse selon les vitesses de courant

Les vitesses de courant retenues pour cette analyse sont différentes de celles qui ont été retenues dans l'analyse préliminaire des sites de référence. En effet il est apparu qu'à l'usage il était préférable de prendre comme limite de troisième classe de vitesse la valeur de 0,6 m/s qui est déjà fortement discriminante (Cf. Bacchi, 2000 ; fig. 57 page 156). En effet il est assez courant de constater sur la Loire moyenne, en période d'étiage, que les vitesses de courant maximales que l'on puisse trouver sont inférieures à 0,8 m/s. L'utilisation du seuil 0,8 m/s ne permettait donc pas une bonne différenciation des vitesses de courant relativement fortes (de 0,6 à 0,8 m/s) alors même que des différences faunistiques étaient relativement marquées.

Nous avons en conséquence établi une première classe pour des vitesses inférieures à 0.2 m/s, une deuxième classe pour des vitesses comprises entre 0.2 et 0.6 m/s et une troisième classe pour des vitesses supérieures à 0.6 m/s.

L'analyse de la variété taxinomique moyenne en fonction des vitesses de courant (fig. 10) nous permet de faire les observations suivantes :

Abondance : elle est maximale pour les vitesses de courant fortes et minimale pour les vitesses de courant faibles ;

Richesse taxinomique : elle est maximale pour les vitesses de courant moyennes, et minimale pour les vitesses de courant les plus importantes ;

Diversité de Shannon : cet indice est maximum pour les vitesses de courant faibles, et minimum pour les vitesses de courant fortes ;

Équitabilité : même variations que pour l'indice de Shannon.

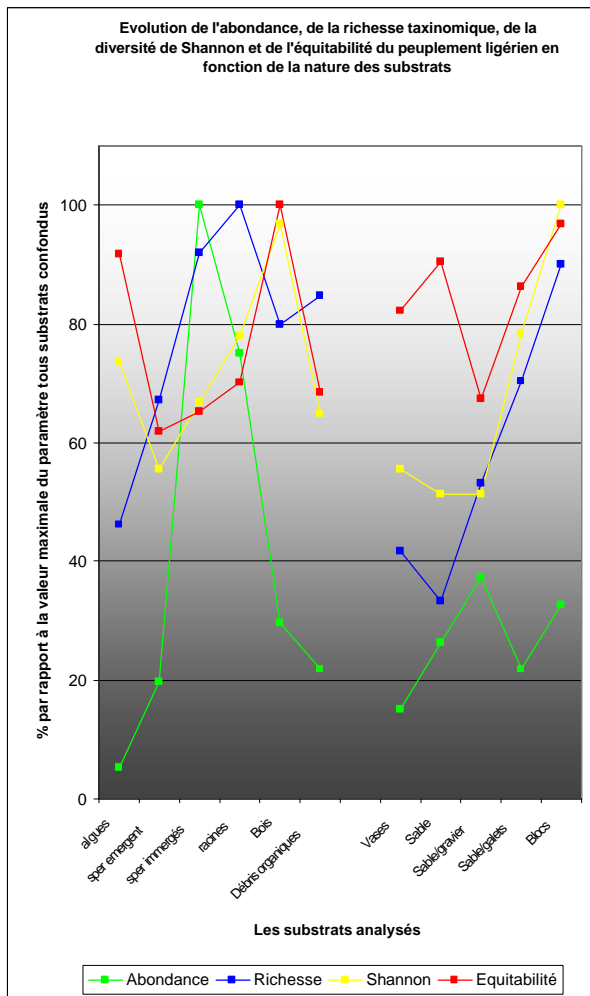


Fig. 9 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité selon la nature du substrat

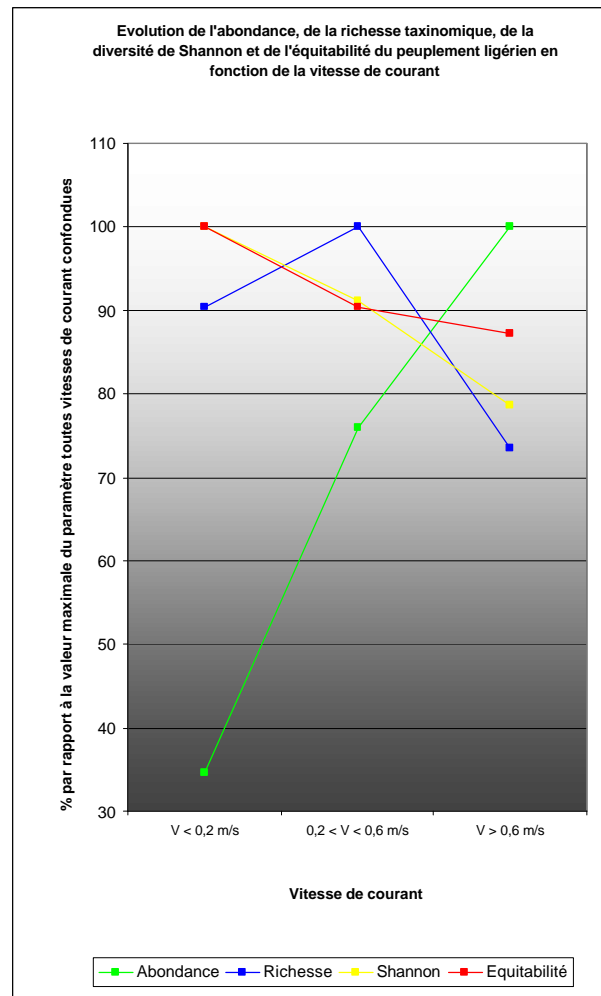


Fig. 10 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité selon la vitesse de courant.

3.2.1.c Analyse selon les substrats et les vitesses de courant

Comme nous pouvons le constater dans la fig. 11 ci-dessous, il existe de très grandes différences, pour chaque paramètre analysé et pour chaque type de substrat en fonction des vitesses de courant.

Il n'est pas possible ici de décrire et d'expliquer l'ensemble des variations observables qui sont complexes. Elles résultent, pour l'essentiel, des potentialités d'accueil offertes à la macrofaune benthique par chaque type de substrat, mais aussi de leur capacité à ne pas être déstructuré par de fortes vitesses de courant.

On note une diversité selon Shannon et une équitabilité maximales pour les blocs en vitesse lente, une richesse taxinomique très élevée pour les débris organiques dans des vitesses moyennes et une abondance globale maximale pour les végétaux immergés dans des vitesses de courant fortes.

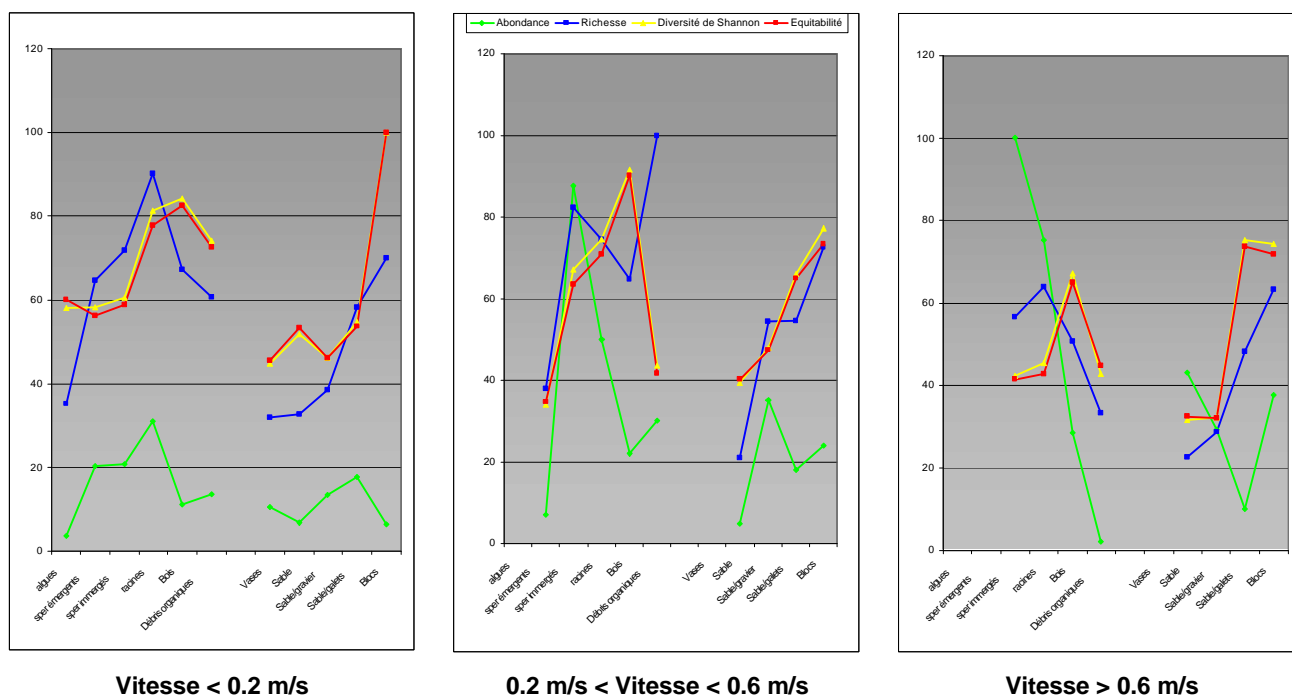


Fig. 11 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité en fonction de la nature des substrats (En abscisse la nature des substrats, en ordonnée % par rapport à la valeur maximale de chaque substrat toutes vitesses confondues)

3.2.2. Analyse de la variété taxinomique moyenne des différentes populations ligériennes

Les différentes populations ligériennes sont analysées successivement pour leur affinité en fonction des substrats, des vitesses de courant et des couples substrat/vitesse.

3.2.2.a Analyse selon la nature du substrat

Les résultats sont présentés sur la figure 12. On remarque :

Plécoptères : le faible nombre de relevés comportant des Plécoptères ne permet pas de définir le substrat préférentiel de ces insectes. On remarque toutefois une affinité marquée pour les galets et les blocs.

Ephéméroptères : la variété taxinomique des Ephéméroptères est maximale pour les substrats « support », bois ou blocs et dans une moindre mesure pour les racines et les végétaux immergés.

Trichoptères : ils ne présentent pas comme les Ephéméroptères une affinité marquée pour un ou plusieurs types de substrat. Ils sont toutefois très peu présents dans les algues, le sable et la vase.

Coléoptères : ils ont une nette préférence pour les substrats organiques en général et plus particulièrement pour les végétaux immergés et émergents et les racines

Odonates : bien que présentes en général en faible nombre, leur habitat semble proche de celui des Coléoptères.

EPT¹ : mêmes variations que pour les Ephémères seules.

Peuplement global sauf EPT : Variations globalement identiques aux EPT mais avec toutefois une différence très marquée pour le substrat bois.

¹ E.P.T. Ephémères, plécoptères et trichoptères

3.2.2.b Analyse selon la vitesse de courant

Les résultats sont présentés sur la figure 13. On remarque :

Plécoptères : préférence marquée pour des vitesses de courant rapide.

Ephéméroptères : affinité marquée pour les vitesses de courant moyennes puis pour les vitesses faibles. Les vitesses de courant fortes sont moins appréciées.

Trichoptères : contrairement aux Ephéméroptères, les Trichoptères de la Loire recherchent les vitesses de courant rapides. Le nombre moyen de Trichoptères par prélèvement est minimum pour les vitesses faibles.

Coléoptères : la variété par prélèvement est minimum pour les vitesses fortes. Peu de différences entre les vitesses faibles et moyennes.

Odonates : Nette préférence pour les vitesses de courant faibles.

EPT : Nombre moyen de genres maximum en vitesse de courant moyenne et minimum pour les vitesses de courant faibles.

Peuplement global sauf EPT : nombre moyen de genres maximum en vitesse faible et minimum pour des vitesses de courant rapides.

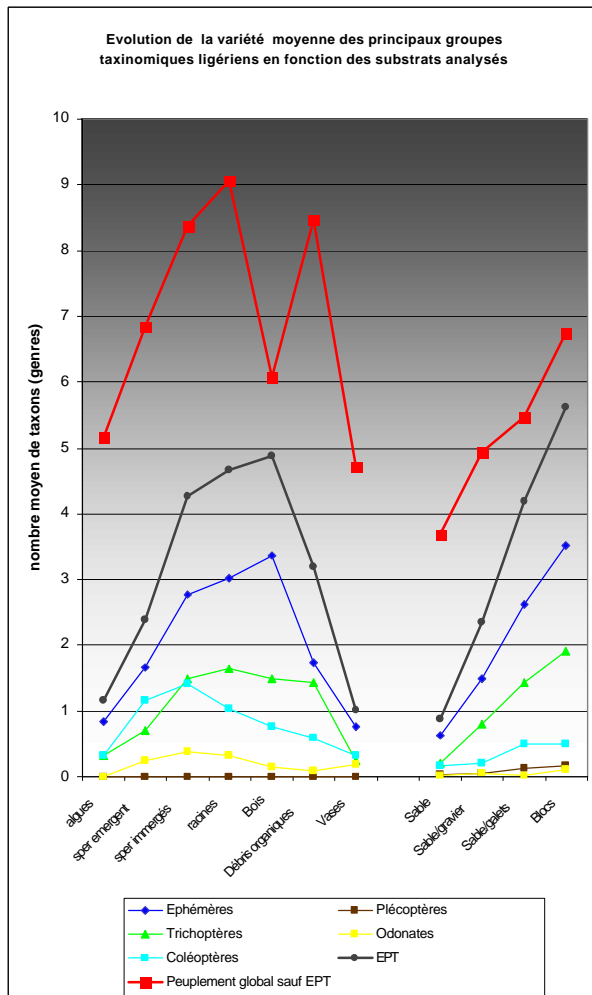


Fig. 12 : Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques pour différents substrats

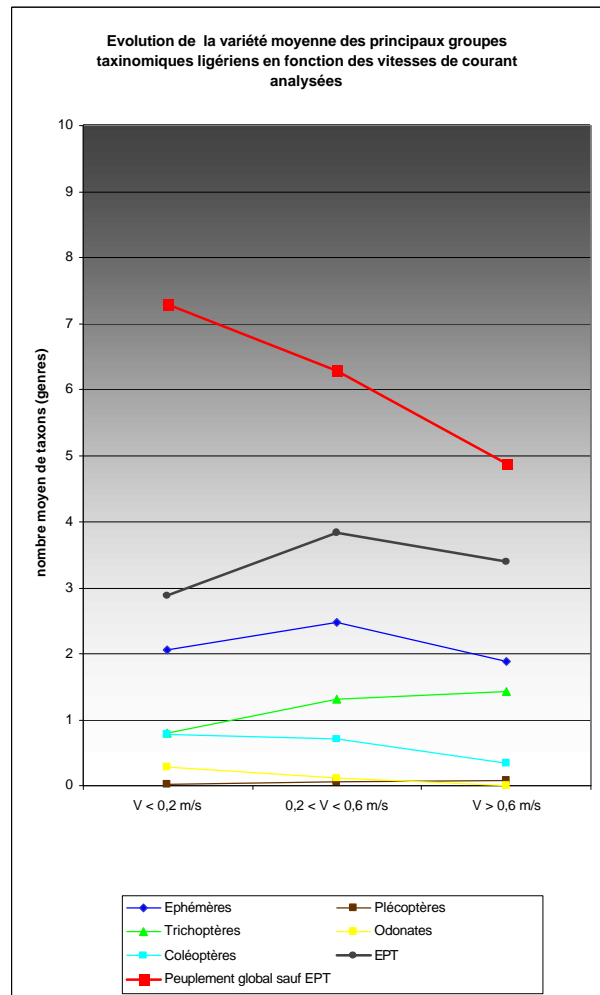


Fig. 13 : Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques pour différentes vitesses de courant.

3.2.2.c Selon la nature du substrat et la vitesse du courant

L'analyse de la variété taxinomique moyenne par type de substrat en fonction des vitesses de courant est indispensable car ce sont ces deux facteurs associés qui caractérisent le mieux les habitats aquatiques.

Comme nous pouvons le constater sur la fig. 14 ci-dessous, on retrouve les remarques évoquées globalement pour chacun des paramètres. On voit ainsi très nettement pour tous les groupes analysés la diminution de la variété taxinomique pour des vitesses de courant rapides.

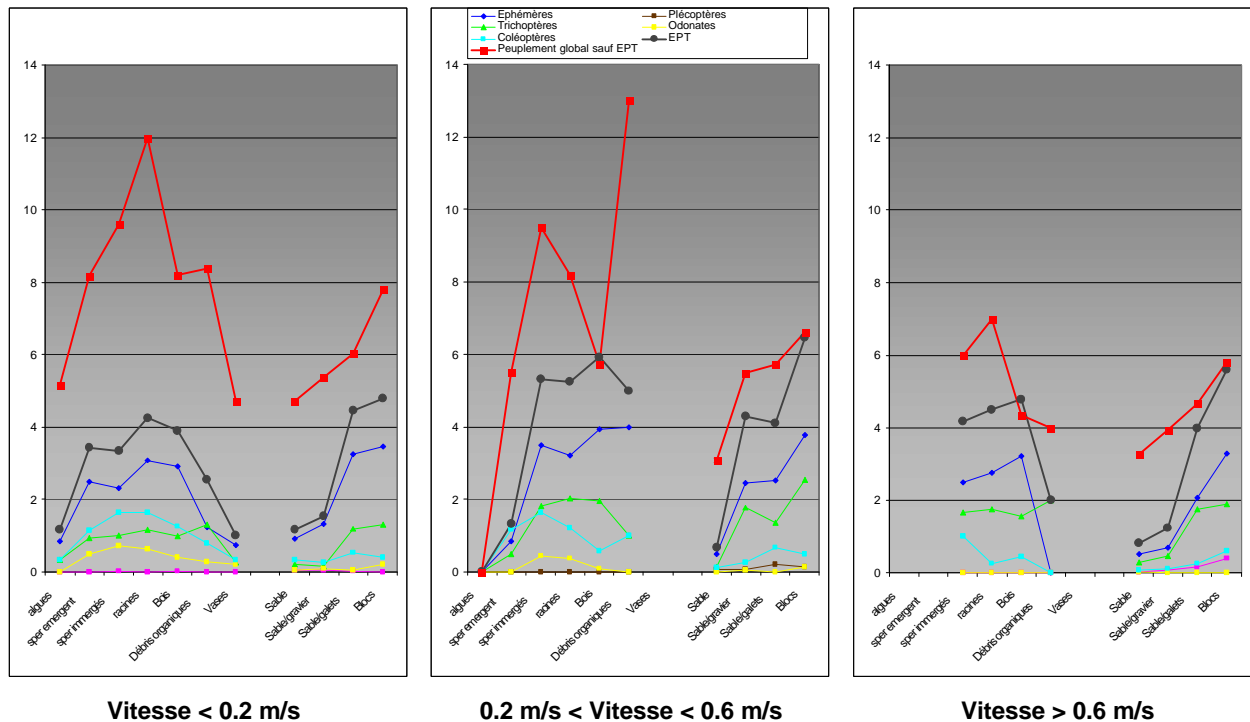


Fig. 14 : Evolution de la richesse taxinomique des principaux groupes faunistiques en fonction de la nature du substrat et des vitesses de courant

(En abscisse la nature des substrats, en ordonnée % par rapport à la valeur maximale de chaque substrat toutes vitesses confondues)

Plécoptères : très peu présents, il est difficile de déterminer leur préférence pour un couple substrat/vitesse. Ils semblent présents en vitesse lente dans tous les types de substrat et en vitesse rapide presque exclusivement dans les galets et les blocs

Ephéméroptères : on retrouve sur ces courbes l'affinité des taxons de ce groupe pour les vitesses moyennes de courant. Les substrats «support » comme les blocs, les galets, les bois, les végétaux immergés sont préférés aux autres types de substrats.

Trichoptères : on retrouve l'affinité des taxons de ce groupe pour les vitesses de courant moyennes et fortes. Tous les substrats sont susceptibles d'être colonisés à l'exception des sédiments les plus fins (vase, sable, sable/graviers) mais aussi les algues.

Coléoptères : ces taxons sont beaucoup plus présents dans des vitesses lentes et moyennes que dans de fortes vitesses de courant. Quelque soit la vitesse de courant on note leur affinité pour les substrats organiques. Dans les substrats minéraux on ne les retrouve que dans les blocs et les galets et ceci quelque soit la vitesse de courant.

Odonates : la distribution de ces taxons suit la distribution des Coléoptères. On remarque toutefois leur quasi absence des substrats minéraux et des zones de vitesse de courant rapides

EPT : la variété taxinomique de ce groupe est maximale pour les vitesses de courant moyennes.

Peuplement global sauf EPT : on remarque l'affinité des taxons autres que Ephémères, Plécoptères, et Trichoptères pour les vitesses de courant faibles ou moyennes. On remarque leur peu d'affinité pour le substrat bois en vitesse de courant moyenne.

4. La modélisation de l'écosystème ligérien : Principe et méthode

4.1. Les variables analysées

Les variables retenues sont celles qui ont été utilisées pour les sites de référence.

4.1.1. Les facteurs de macro-distribution

Les paramètres de macro-distribution retenus dans la présente étude sont la nature des annexes hydrauliques (Lit vif, bras morts et boires). Une attention particulière sera apportée à l'habitat des berges. Compte tenu de la position de la Boire de Champtocé en amont du site, elle n'a pas été prise en compte dans la modélisation du système biologique.

4.1.2. Les facteurs de micro-distribution

Les paramètres de micro-distribution retenus sont ceux utilisés sur les sites de référence avec toutefois certaines modifications. En effet, il a pu être démontré au cours de différents travaux (Bacchi, 2000) que les populations macro-benthiques ne sont sensibles qu'à la fraction la plus grossière des substrats minéraux. Aussi, les « sables-graviers-galets » et « graviers-galets » et les galets ont été regroupés tout comme les « sables-graviers » et les « graviers ».

11 substrats différents seront donc utilisés pour la suite de l'étude :

- ⇒ 6 substrats de nature organique (algues, végétaux immergés, végétaux émergents, racines, bois, débris organiques),
- ⇒ 5 substrats à dominante minérale (vases, sables, graviers, galets, blocs),
- ⇒ les enrochements ont été assimilés à des blocs naturels car nous ne disposons pas, pour l'instant, de données qualitatives et quantitatives sur le potentiel biologique des substrats non naturels en Loire.

4.1.3. Les groupes faunistiques

Le peuplement macro-benthique ligérien a été analysé soit globalement, soit en étudiant séparément différents groupes taxinomiques : les Ephéméroptères, les Plécoptères, les Trichoptères, les Coléoptères et les Odonates. Il sera aussi pris en compte de façon conjointe les Ephéméroptères les Plécoptères et les Trichoptères (EPT) et le peuplement global moins ce dernier groupe.

Le niveau taxinomique retenu est le genre pour les cinq principaux groupes : Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères, Coléoptères et Odonates, et la famille pour les autres taxons constituant le peuplement.

4.1.4. Les variables faunistiques analysées

Différentes variables seront analysées pour la détermination des scores. Ces variables sont celles qui caractérisent le plus classiquement les peuplements. Il s'agit de :

4.1.4.a L'abondance

L'abondance caractérise le nombre total d'individus dénombrés dans un type d'habitat déterminé. C'est en fait toujours une mesure de densité puisqu'il s'agit d'une mesure du nombre d'individus par unité d'échantillonnage (1/20° de m², Bacchi, 2000).

L'abondance retenue ici est la moyenne de l'abondance observée sur les mêmes habitats dans les sites de référence.

4.1.4.b La richesse taxinomique

La richesse (variété) taxinomique d'un peuplement caractérise le nombre total de taxons (espèces, genres ou familles selon les groupes taxinomiques considérés) qui constituent le peuplement. La richesse taxinomique retenue ici est la moyenne observée sur les mêmes habitats dans les sites de référence.

Cette richesse sera exprimée de différente façon dans la modélisation : soit sous forme brute, soit en la corrigeant par la spécificité taxinomique de différents macro habitats (lit vif, bras mort) ou micro habitats (substrat / vitesse).

4.1.4.c La diversité selon Shannon et selon Margaleff

La diversité taxinomique selon Shannon est souvent utilisée car la seule richesse taxinomique ne permet pas de différencier des peuplements qui comporteraient le même nombre d'espèces avec des fréquences relatives très différentes. Ainsi la mesure de diversité exprime l'état de complexité (entropie) de l'arrangement quantitatif mutuel des différentes catégories (espèces) constituant le peuplement. La diversité est exprimée en bits et les valeurs retenues dans la modélisation sont des valeurs moyennes observées sur les sites de référence pour les mêmes habitats.

Les indices de diversité permettent de comparer de façon diachronique ou synchronique différents peuplements. En général, une diversité élevée caractérise un peuplement mûr et sénile avec une composition spécifique complexe et des abondances faibles. Une diversité faible caractérise un peuplement jeune doté d'un haut pouvoir de multiplication (grandes abondances) et dominé par quelques espèces. Ceci traduit des conditions défavorables et/ou un modèle spécialisé.

4.1.4.d L'équitabilité

La valeur de l'équitabilité nous renseigne sur le degré d'équilibre d'un peuplement. Elle se calcule en faisant le rapport de la diversité observée à la diversité maximale que pourrait atteindre le peuplement pour un même nombre d'espèce. Elle varie entre 0 et 1 ; 1 étant la valeur maximale que l'on puisse obtenir si il y a équirépartition de toutes les espèces du peuplement.

4.2. Méthodologie

4.2.1. Méthode de calcul des surfaces et mode de représentation cartographique

Comme nous l'avons évoqué en préambule, la détermination de la valeur biologique potentielle d'un site de Loire est possible par la caractérisation des principales structures d'habitat. En effet, la caractérisation des couples substrat-vitesse en fonction de variables faunistiques décrivant les peuplements en place (nature de la faune, variété / diversité du peuplement, abondance globale des taxons, variété / abondance des principaux groupes taxinomiques...) permet, si les principaux habitats présents (couples substrat-vitesse) sont identifiés qualitativement mais surtout quantitativement au moyen d'une technique cartographique adaptée, d'attribuer sur un espace géographique particulier un « score » caractéristique d'un état donné.

Le score obtenu, proportionnel à la surface du site analysé, permet deux types d'analyse :

- ⇒ l'une diachronique, pour démontrer les effets de travaux et d'aménagement sur l'hydrosystème ligérien en comparant les scores relatifs à deux états du milieu (avant et après intervention) ;
- ⇒ L'autre synchronique pour comparer, à surface équivalente la valeur biologique de différents sites de Loire.

La réalisation de ce travail nécessite la cartographie des habitats aquatiques sur les différents sites. Ce travail est réalisé à partir de photos aériennes. Les substrats et les vitesses de courant sont repérés sur le terrain et les données sont reprises dans un Système d'Information Géographique (MapInfo) en faisant certaines extrapolations nécessaires (les bancs de sable pouvant évoluer entre la prise des clichés et l'analyse de terrain).

La méthode qui a été retenue dans le présent travail a nécessité une double approche :

- Dans un premier temps, on caractérise les habitats présents sur l'ensemble du lit vif en période d'étiage (Fig. 15). Quatre types de documents sont réalisés : les cartes des substrats, les cartes des vitesses de courant, les cartes des couples substrat / vitesse obtenues par superposition des cartes précédentes et la carte de localisation des secteurs homogènes en berge et de certains éléments remarquables intervenant dans la caractérisation des habitats ligériens (épis, enrochements ponctuels...). Ces cartes permettent de calculer la surface de toutes les variables descriptives de l'habitat qui nous permettront de calculer les « scores » propres à chaque site.

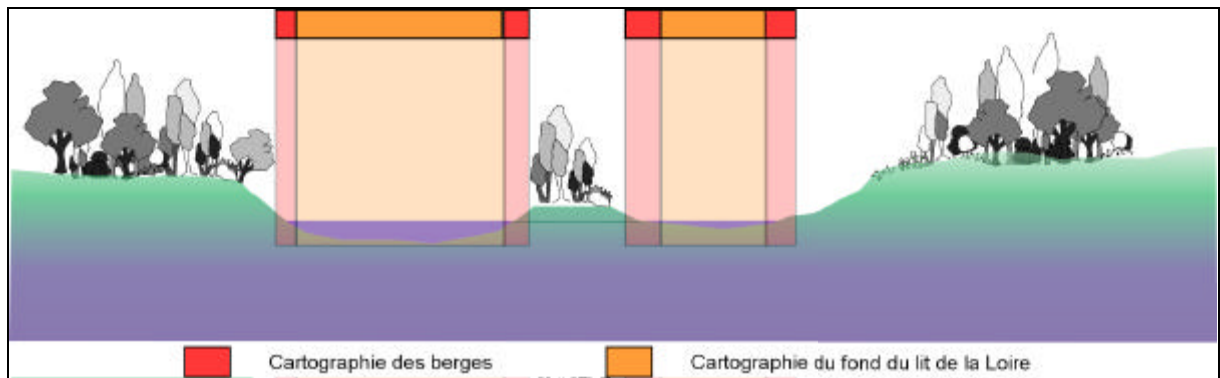


Fig. 15 : cartographie du lit de la Loire à l'étiage.

- Dans un deuxième temps, on caractérise l'ensemble du lit en prenant en compte tous les secteurs qui pourraient être potentiellement inondés lors de périodes de hautes eaux (Fig. 16). Ce travail n'est réalisé que pour les substrats (les vitesses de courants ne pouvant être prises en compte en dehors de la période d'étiage car très variables dans l'espace et le temps).

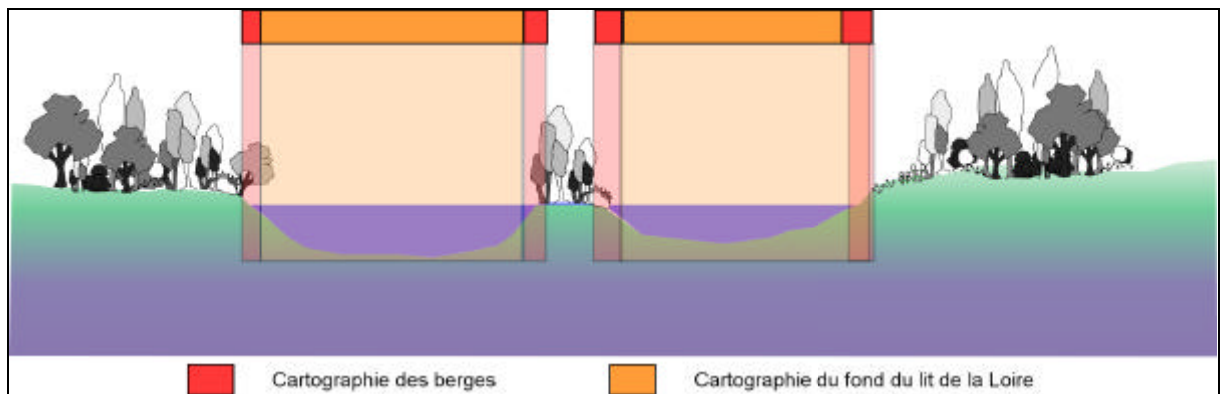


Figure 16 : cartographie du lit de la Loire hors de la période d'étiage.

Ce travail permet de comparer la valeur biologique de différents sites pris dans leur ensemble ; ce que ne permet pas la seule représentation à l'étiage. Comme il n'y a pas de caractérisation des vitesses de courant, le calcul d'un score ne peut pas être envisagé ici (mais ce calcul serait possible si l'on attribuait une valeur biologique au substrat et non au couple substrat vitesse).

4.2.2. Détermination de la valeur biologique potentielle des sites

Le « score » biologique potentiel de chacun des sites est déterminé en utilisant les valeurs des différentes variables descriptives des peuplements calculées à partir de l'ensemble des prélèvements réalisés sur les sites de Bréhémont et de la Charité sur Loire.

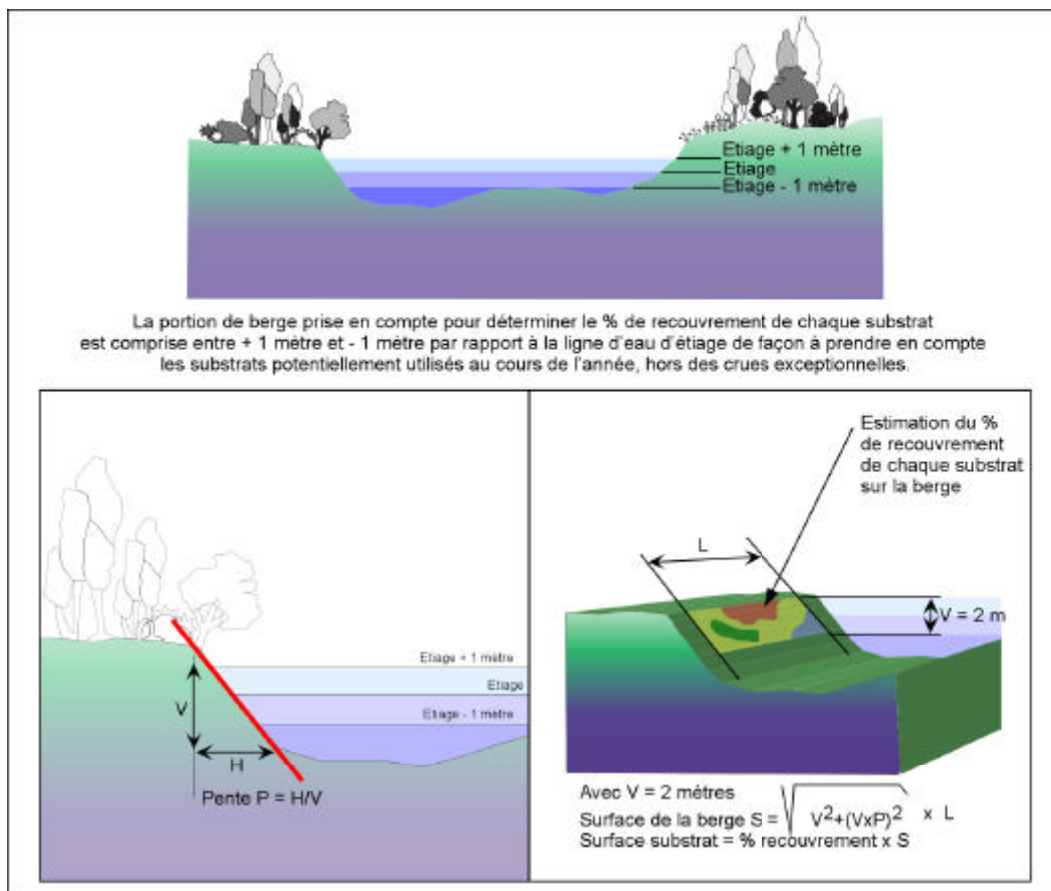


Fig. 17 : Méthode utilisée pour la détermination de la surface de chaque substrat en berge.

Le score est obtenu par la somme de la surface occupée par chaque couple substrat-vitesse (Fig. 17) multipliée par les valeurs de chacune des variables caractérisant les peuplements (variété taxinomique, abondance, diversité, ...).

$$\text{Score} = \sum(\text{variable} \times \text{surface})$$

n nombre total de couples substrat vitesse

Si une analyse directe peut être faite dans le cadre d'une analyse diachronique, puisque la surface analysée restera la même, la comparaison synchronique des scores est possible en faisant une double correction :

- ⇒ la première en corrigeant au besoin le score obtenu par la surface totale de chacun des site de façon à donner un score biologique à surface équivalente ;

- ⇒ la deuxième en utilisant le pourcentage de chacun des scores calculés précédemment par rapport à la valeur maximale obtenue pour un paramètre donné sur l'ensemble des sites. Cela afin de permettre une comparaison entre les différents indices.

II^{ème} partie Analyse du site d'Ingrandes

Table des Matières

1.	<i>Présentation du site</i>	30
1.1.	Présentation cartographique du site d'Ingrandes	32
	1.1.1. Carte des substrats	32
	1.1.2. Carte des vitesses de courant	33
	1.1.3. Carte des couples substrat vitesse	34
	1.1.4. Localisation des secteurs inventoriés en berge	35
2.	<i>Approche comparée du site d'Ingrandes avec d'autres sites de Loire</i>	37
2.1.	Analyse globale des différents sites	38
	2.1.1. Les facteurs de micro-distribution de l'ensemble du chenal	38
	2.1.2. Les facteurs de micro-distribution en berge	38
2.2.	Analyse des annexes hydrauliques (bras morts) des différents sites analysés	39
3.	<i>Modélisation biologique à l'étiage des différents sites</i>	41
3.1.	Analyse globale des sites	41
	3.1.1. Analyse des variables descriptives des peuplements	41
	3.1.2. Analyse des peuplements	43
3.2.	Analyse du chenal principal (lit vif et berges)	45
	3.2.1. Analyse des variables descriptives des peuplements	45
	3.2.2. Analyse des peuplements	47
4.	<i>Analyse comparée du site d'Ingrandes avant et après travaux</i>	49
4.1.	Les scénarii de modélisation	49
4.2.	Analyse du site après travaux	49
	4.2.1. Photos des ouvrages en cours de construction	49
	4.2.2. Carte des substrats	51
	4.2.3. Carte des vitesses de courant	52
	4.2.4. Carte des couples substrat vitesse	53
	4.2.5. Localisation des secteurs inventoriés en berge	54
4.3.	Analyse des scores macrobenthiques	55
	4.3.1. Analyse des variables descriptives du peuplement.	55
	4.3.2. Analyse des peuplements.	56
4.4.	Analyse comparée avec les sites de référence	57

1. Présentation du site

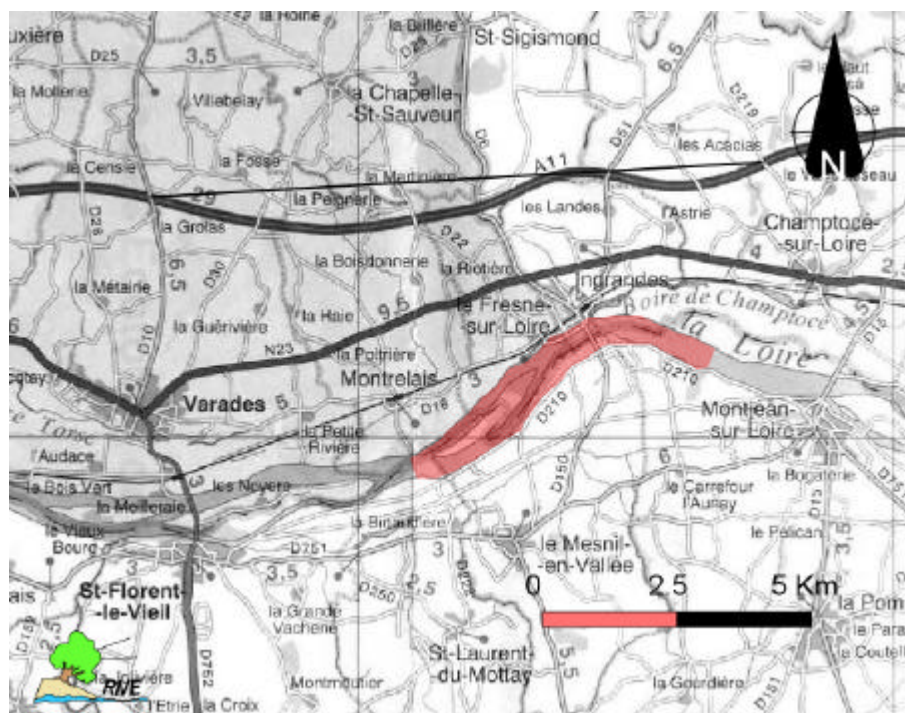


Fig. 18 Carte de localisation du site d'Ingrandes où les habitats macro-benthiques seront caractérisés (IGN 1 :125000)

Le site d'Ingrandes est localisé au droit des villes d'Ingrandes et Le Fresne-Sur-Loire (Fig. 18). La portion de Loire retenue dans ce travail se situe en amont et en aval de l'île Meslet où un aménagement de seuils destinés à relever la ligne d'eau d'étiage va être réalisé. Ces ouvrages ont aussi pour objet de favoriser le rééquilibrage sédimentaire de part et d'autre de l'île Meslet par remobilisation des sables du bras de Cul-de-Bœuf (au sud) au profit de la sédimentation dans le bras navigable (au nord).

Dans ce travail, nous ne prendrons pas en compte la boire de Champtocé qui se situe en amont du site. En effet, l'augmentation de la ligne d'eau à l'étiage ne paraît pas, d'après les données dont nous disposons, suffisante pour apporter des changements notables dans la valeur faunistique (macro-faune benthique) de cette annexe hydraulique avant et après travaux. Cette annexe hydraulique constitue toutefois un grand intérêt, tant au niveau botanique que faunistique (poissons, avifaune, herpétofaune...).

Une illustration photographique du site est donnée page suivante.

Le tableau VII ci-dessous résume les principales caractéristiques morphologiques du site.

	Ingrandes
Surface totale du site	487 ha
Surface des îles	69 ha
Surface du lit principal	294 ha
Surface du bras mort (bras de Cul-de-Bœuf)	124 ha
Surface du lit principal (%)	60.4 %
Surface du bras mort (%)	25,5 %

Tableau VII : principales caractéristiques du site de Ingrandes



Photo 1 : Vue de l'amont du site



Photo 2 : Vue de l'amont du site



Photo 3 : Vue de l'ouvrage en construction



Photo 4 : Vue de l'ouvrage en construction



Photo 5 : Vue de la partie aval du site



Photo 6 : Vue de la partie en eau du bras de Cul de Bœuf

1.1. Présentation cartographique du site d'Ingrandes

Différentes cartes ont été établies sur le site de Ingrandes. Elles sont représentées ci-dessous et les fichiers informatiques au format MAPINFO sont fournis dans le CD ROM joint.

Quatre représentations du site avant travaux sont illustrées ici :

Fig. 19a : carte des substrats,

Fig. 19b : carte des vitesses de courant,

Fig. 19c : carte des couples substrat / vitesses de courant,

Fig. 19d : localisation des secteurs inventoriés en berge et localisation des ouvrages de navigation (épis...).

Les principales caractéristiques du site sont données dans les tableaux accompagnant les différentes cartes thématique :

1.1.1. Carte des substrats

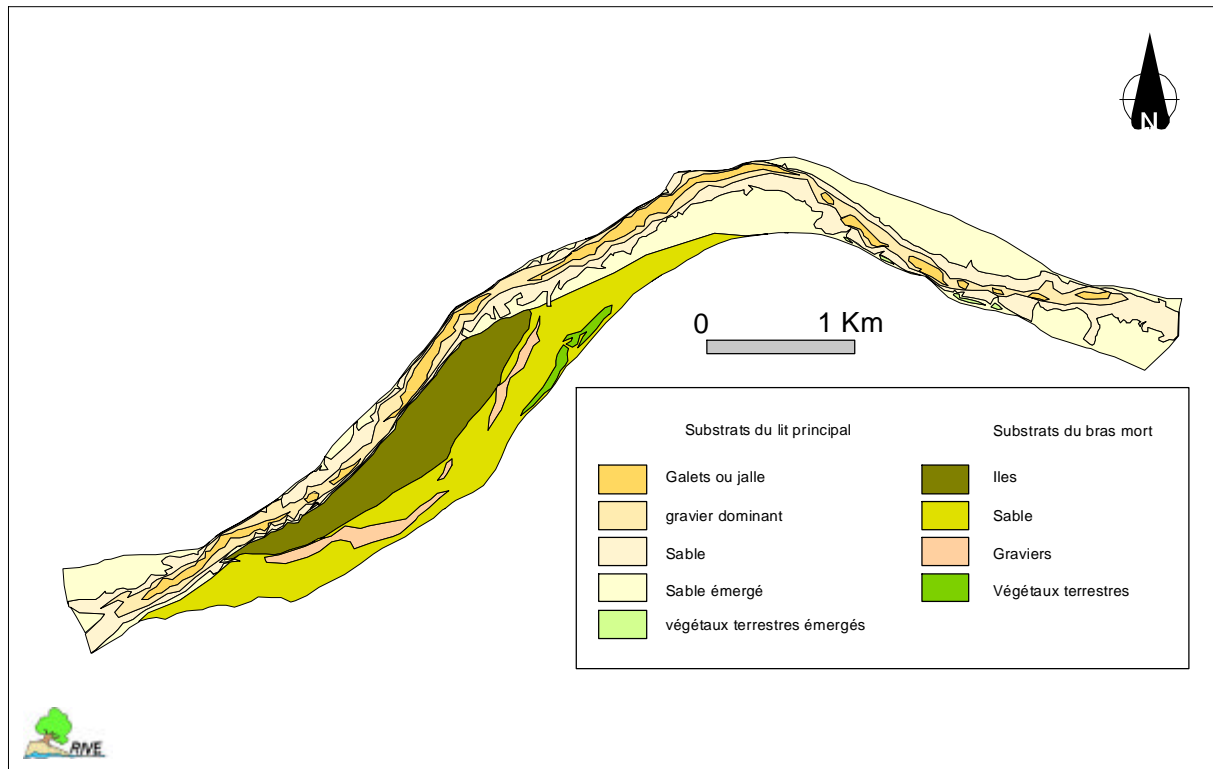


Fig. 19a : carte des substrats sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux

	Sables graviers galets Immergés	Sables graviers Immergés	Sables	Végétaux	Blocs	Sable émergé	Iles	Total
Surface en Ha	29	52	85	5	3	248	69	490
% par rapport à la surface totale	5,9 %	10,6 %	17,5 %	1 %	0,6 %	50,6 %	14 %	100 %

Tableau VIIIa : recouvrement de différents types de substrats sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux.

La carte des substrats (Fig. 19a) montre une structure simplifiée à cause de l'importance prise sur le site par les ouvrages de navigation qui chenalisent très fortement l'hydrosystème.

Les principaux substrats que l'on rencontre sur le site (tableau VIIIa) sont les sables et les sables-graviers. Dans les secteurs où la chenalisation est la plus active, le fond du lit de la rivière est formé par la « jale » et/ou des dalles rocheuses qui constituent le substratum naturel du fond du lit de la rivière.

L'île Meslet couvre une surface relativement importante sur le site (1/5 de la surface). Les sédiments émergés à l'étiage couvrent environ 1/3 de la surface totale du site.

1.1.2. Carte des vitesses de courant

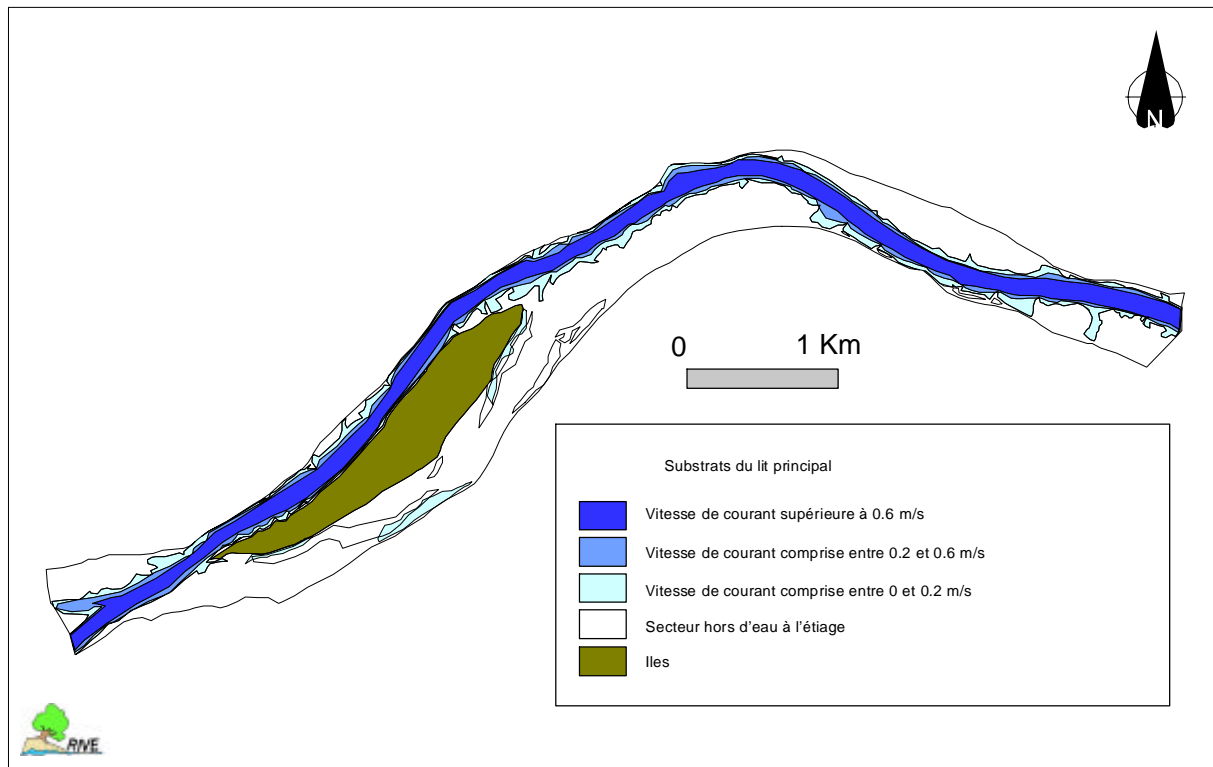


Fig. 19b : carte des Vitesses de courant sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux

	V < 0.2 m/s	0.2 < V < 0.6 m/s	V > 0.6 m/s	Total
Surface en Ha	51	32	89.5	172.5
% par rapport à la surface totale	29.5 %	18.5 %	52.9 %	100 %

Tableau VIIIb : recouvrement de différents types des vitesses de courant sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux

Du fait de la chenalisation imposée par les ouvrages de navigation, les vitesses de courant restent importantes à l'étiage (Fig 19b). En effet, les vitesses de courant fortes (supérieures à 0,6 m/s) représentent plus de la moitié de la surface en eau alors que les vitesses de courant moyennes ne caractérisent qu'une très faible part des champs de vitesse de courant observés (tableau VIIIb).

Les surfaces lénitiques, inférieures à 0,2 m/s, ne représentent que 30 % de la surface totale en eau. Elles sont localisées principalement en arrière des ouvrages de navigation et, pour une faible part, dans le bras de Cul-de-Bœuf où l'on observe à l'étiage quelques plans d'eau déconnectés du lit principal du fleuve.

1.1.3. Carte des couples substrat vitesse

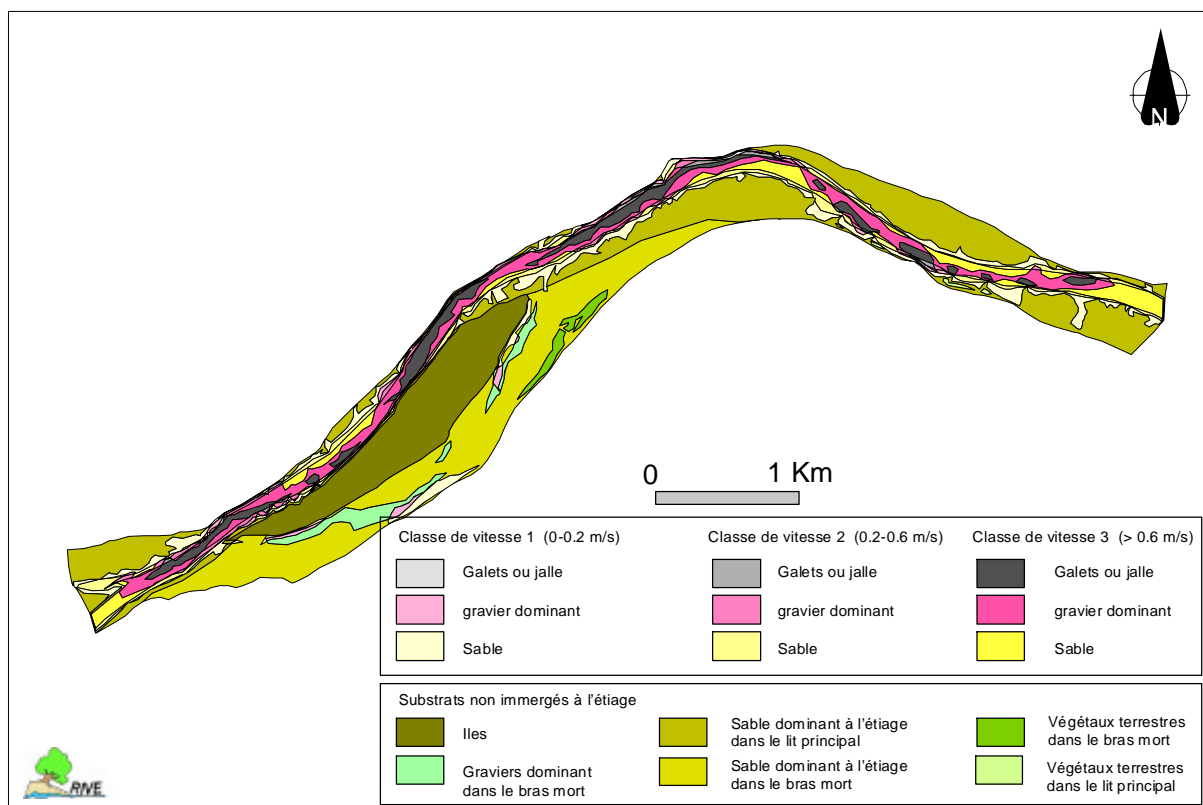


Fig. 19c : carte des couples substrats/vitesse de courant sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux

Analyse du chenal principal

Lit Principal	Sables gravier galets Immergés	Sables gravier Immergés	Sables	Végétaux	Blocs immergés	Sables émergés	Gravier émergés	Total ha
Surface en Ha V < 0.2 m/s	0.77	4.6	38.41	0.69	0.37	128.6	11.73	185.2
0.2 < V < 0.6 m/s	2.6	8.75	20.61		0.92			32.9
V > 0.6 m/s	25.2	38.5	25.85		0.65			90.2
								308

Tableau VIIIc1 : recouvrement de différents habitats (couples substrat-vitesse dans le chenal principal du site d'Ingrandes. Etat avant travaux

Comme on peut le constater sur la figure 19c et sur le tableau VIIIc ci-dessus, les substrats immergés et dominants à l'étiage sur le site de Ingrandes sont les sables dans toutes les classes de vitesses de courant, les sables-gravier dans les vitesses de courant supérieures à 0.6 m/s et le mélange sables-gravier-galets (mélange auquel la « jalle » a été assimilée) dans les vitesses de courant fortes.

Les autres substrats ne représentent, du fait de la forte chenalisation de l'hydrosystème, que des valeurs faibles. On note l'importance prise par les substrats sables et graviers

émergents en terme de surface à l'étiage. Les végétaux correspondent au développement d'une jeune végétation ligneuse de type saulaie peupleraie qui s'implante sur les sédiments stabilisés en arrière des épis. Cette végétation est prise en compte dans la caractérisation des habitats aquatiques dans la mesure où elle est pérenne y compris en période de hautes eaux.

Les blocs correspondent ici aux blocs des épis immergés en période d'étiage.

Le bras de Cul-de-Bœuf

Bras de Cul-de-Boeuf	Sables graviers Immergés (V < 0.2 m/s)	Sables immergés (V < 0.2 m/s)	Végétaux	Sables émergés	Graviers émergés	Total
Surface en Ha	2.35	4.7	4.8	102	11.7	126
% de recouvrement	1.9 %	3.7 %	3.8 %	81 %	9.3 %	100 %

Tableau VIIIc2 : recouvrement de différents substrats dans le bras de Cul-de-Bœuf sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux.

Le bras de Cul-de-Bœuf (fig. 19c et tableau VIIIc) est pour l'essentiel constitué de bancs sédimentaires (sables principalement et graviers) dont une surface très importante est émergée à l'étiage. Les végétaux qui représentent environ 4% de la surface totale du bras mort sont essentiellement liés à une jeune saulaie peupleraie pionnière et arbustive qui s'implante sur les parties les plus hautes des bancs sédimentaires.

1.1.4. Localisation des secteurs inventoriés en berge

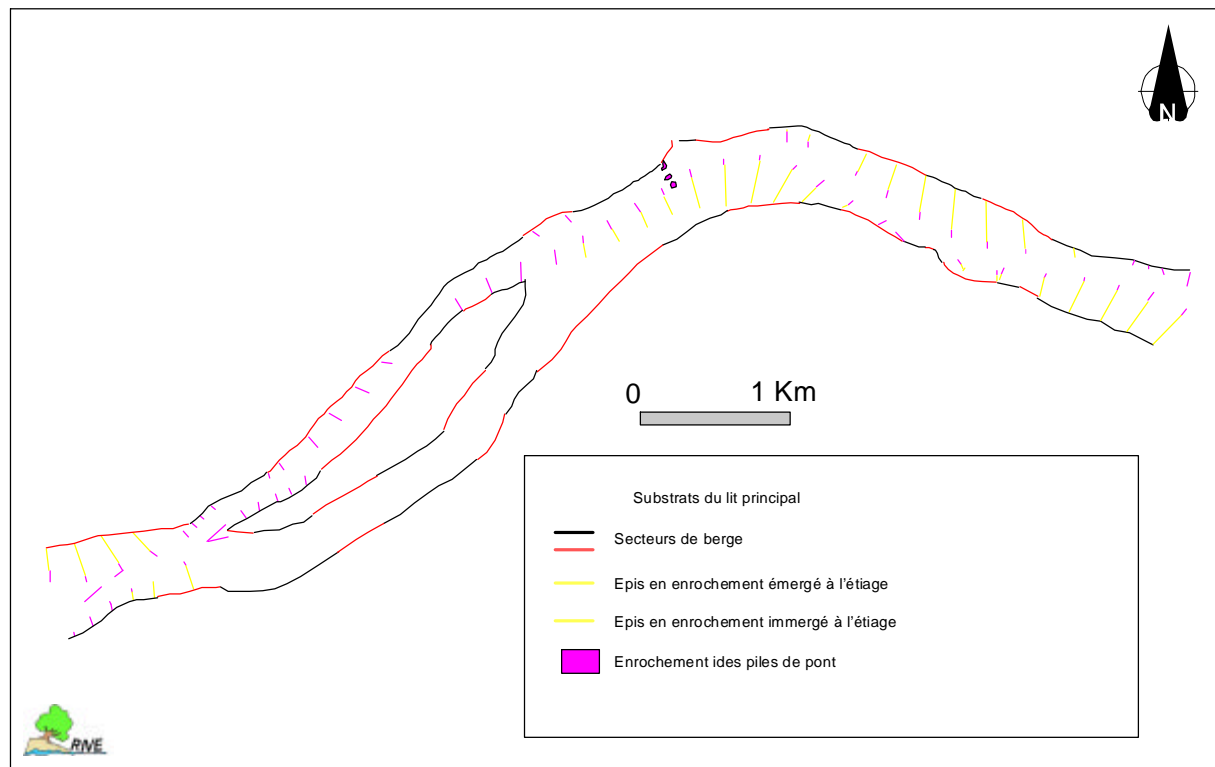


Fig. 19d : carte des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux

	Racines	Végétaux émergents	Végétaux immergés	Bois	Déchets organiques	Blocs	Sables	Vases	Total
Surface en Ha	0,13	1,57	0,002	0,11	0,08	1,69	0,42	0,01	4,02
% par rapport à la surface totale de berge	3,2 %	39,0 %	0,04 %	2,8 %	2,1 %	42,0 %	10,6 %	0,3 %	100 %

Tableau VIII d : recouvrement des substrats des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux.

La surface totale des substrats des berges (Fig. 19d) est estimée à partir du pourcentage de recouvrement de chaque type de substrat sur une section de berge homogène, de la pente de la berge et du linéaire considéré.

Comme on peut le constater dans le tableau VIII d ci-dessus une très grande part des substrats en berge est constituée par les blocs mis en place pour les protéger. Ces blocs qui constituent des milieux artificiels favorisent, en stabilisant le milieu, l'implantation d'hélophytes qui constituent une part importante des substrats que l'on peut aussi y recenser.

Les autres types de substrats apparaissent comme relativement peu abondants. Les bois, les déchets organiques et les racines sont peu nombreux car la végétation arbustive et arborescente est en générale peu développée sur ces berges qui sont très fortement artificialisées.

L'occupation des berges par des blocs ne permet pas l'implantation des herbiers immergés que l'on ne retrouve sur le site qu'en très faible quantité. Il est aussi vraisemblable que cette raréfaction des hydrophytes est liée à une dégradation importante de la qualité des eaux.

	Epis immergés à l'étiage	Epis émergés à l'étiage	Protections diverses en enrochements dans le lit de la rivière	Total
Longueur en Km	3.66	5.22	-	8.88
Surface en Ha	1.84	1.23	0.10	3.17
% par rapport à la surface d'épis	58 %	38.8 %	3.1 %	100 %

Tableau VIII e : surface représentée par les ouvrages anthropiques sur le site de Ingrandes

Les épis pour l'essentiel constitués de blocs d'enrochement sont très fortement représentés sur le site de Ingrandes (Tableau VIII e). La surface de ces enrochements a été estimée de façon globale en prenant en compte la largeur moyenne des ouvrages inventoriés sur le site. On peut noter que la surface totale des ouvrages émergents à l'étiage est proportionnellement plus faible que celle des portions d'ouvrages submergés, car les blocs qui les constituent sont en grande partie recouverts par des sédiments fins (sables et graviers).

2. Approche comparée du site d'Ingrandes avec d'autres sites de Loire

La seule analyse du site d'Ingrandes ne permet pas une analyse critique des scores calculés. En effet, en l'absence d'un référentiel existant, la valeur des habitats d'un site ne peut être appréciée que de façon comparative, soit de façon synchronique en comparant le site d'Ingrandes avec d'autres sites ligériens, soit de façon diachronique en comparant les scores obtenus sur le site d'Ingrandes avant travaux avec les scores estimés après travaux.

Avant de tester le modèle biologique, il nous a semblé opportun de comparer le site de Ingrandes par rapport à d'autres sites inventoriés dans le cadre d'une étude NATURA 2000 (Bacchi, M., Moriette, P.A, 2002). Les six sites utilisés pour comparaison sont situés entre le Bec de Vienne et les Ponts de Cé, donc en amont du site de Ingrandes (Fig. 20).

Il est à noter que les scores par site ont été recalculés pour la présente étude avec la modélisation décrite dans les paragraphes précédents. La modélisation utilisée lors de l'étude NATURA 2000 étant moins précise que celle présentée ici.

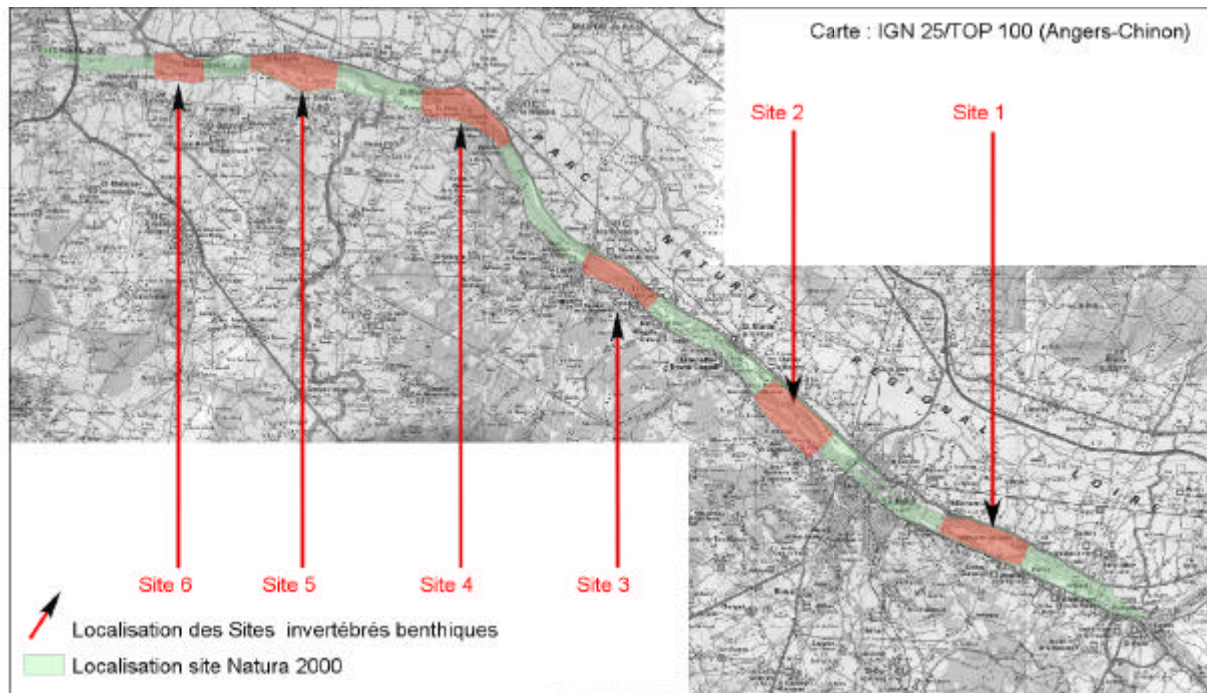


Fig. 20 Carte de localisation des sites de Loire dont les habitats macro-benthiques sont caractérisés

Les principales caractéristiques de chaque site sont données dans le tableau IX ci-dessous et une description cartographique de ces sites est donnée en annexe II pour les différentes variables analysées (substrats, vitesses de courant, couples substrat/vitesse de courant, occupation des berges).

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Ingrandes
Surface du site (km ²)	3,12	2,46	1,93	2,32	1,90	1,87	4.87
Surface des îles (km ²)	1,44	0,78	0,21		0,04	0,29	0.69
Surface des bancs de sable émergés (km ²)	0,57	0,46	0,82	1,00	0,74	0,44	2.34
Linéaire des berges (Km)	14,11	16,13	11,65	8,45	7,95	8,62	22.6
Surface totale/longueur des berges	0,22	0,15	0,17	0,28	0,24	0,22	0.22
Surface totale en eau à l'étiage (km ²)	1,00	1,12	0,84	1,29	1,08	1,11	1.72
Surface bras morts (Km ²)	0,22		0,53			0,05	1.24
% surface bras mort/surface totale	7.1 %		27.5 %			2.7 %	
Surface Boire (km ²)	0,06				0,31		

Tableau IX : principales caractéristiques géomorphologiques des sites de Loire étudiés

Comme on peut le voir dans le tableau IX ci-dessus, ces sites présentent des variations notables qui traduisent les fortes différences morphologiques que l'on peut observer sur les différentes cartes. Ces différences sont analysées dans les paragraphes suivants.

2.1. Analyse globale des différents sites

L'analyse comparative des sites est rendue possible en faisant le ratio entre la surface de chaque élément par rapport à la surface totale. Cette analyse est réalisée sur l'ensemble du site et non pas seulement sur le lit actif en période d'étiage.

Deux analyses sont conduites en considérant de façon simultanée le lit principal et les bras morts :

- la première sur l'ensemble des substrats composant les différents chenaux des sites (chenal du lit principal et chenal du bras mort) ;
- la seconde sur les substrats des berges.

2.1.1. Les facteurs de micro-distribution de l'ensemble du chenal

Comme on peut le voir sur la figure 21, la présence ou l'absence d'île conditionne en grande partie la nature des substrats inventoriés. Ainsi, l'absence d'île favorise la présence de bancs sédimentaires émergés en période d'étiage ainsi que la proportion relative de sable gravier voire même de galets.

2.1.2. Les facteurs de micro-distribution en berge

L'analyse des berges montre une structure plus complexe. En effet, on remarque sur de nombreux sites l'influence marquée des blocs en berge qui ont pour origine des protections par enrochement.

D'une manière générale, la présence d'enrochements sur les berges limite la présence de tout autre substrat et notamment les hélophytes et les racines dont le pourcentage de recouvrement diminue fortement dans ces secteurs.

Le site de Ingrandes se distingue des autres sites dans la mesure où les blocs en berge représentent presque 50% de la surface totale, soit environ deux fois plus que ce que l'on peut observer sur les autres sites.

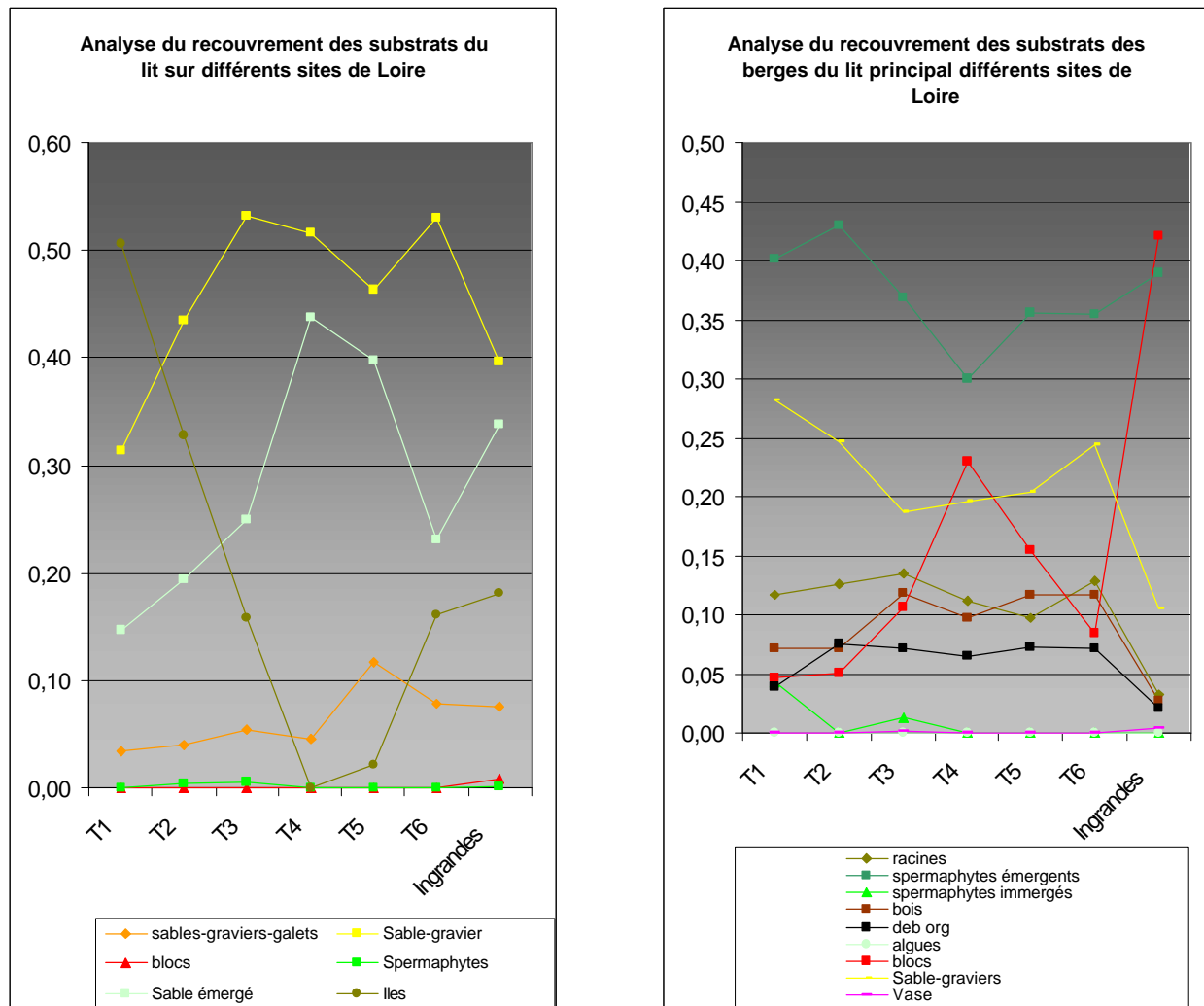


Fig. 21 : Répartition des différents types de substrat du lit (à gauche) et des berges (à droite) des différents sites

2.2. Analyse des annexes hydrauliques (bras morts) des différents sites analysés

Les bras morts ayant une structure faunistique différente de celle du lit principal, il est apparu intéressant de comparer les bras morts des différents sites entre eux.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 22 ci-dessous, on peut observer des différences notables entre les différentes structures mésologiques des bras morts qui expliqueront des variations dans les scores faunistiques obtenus.

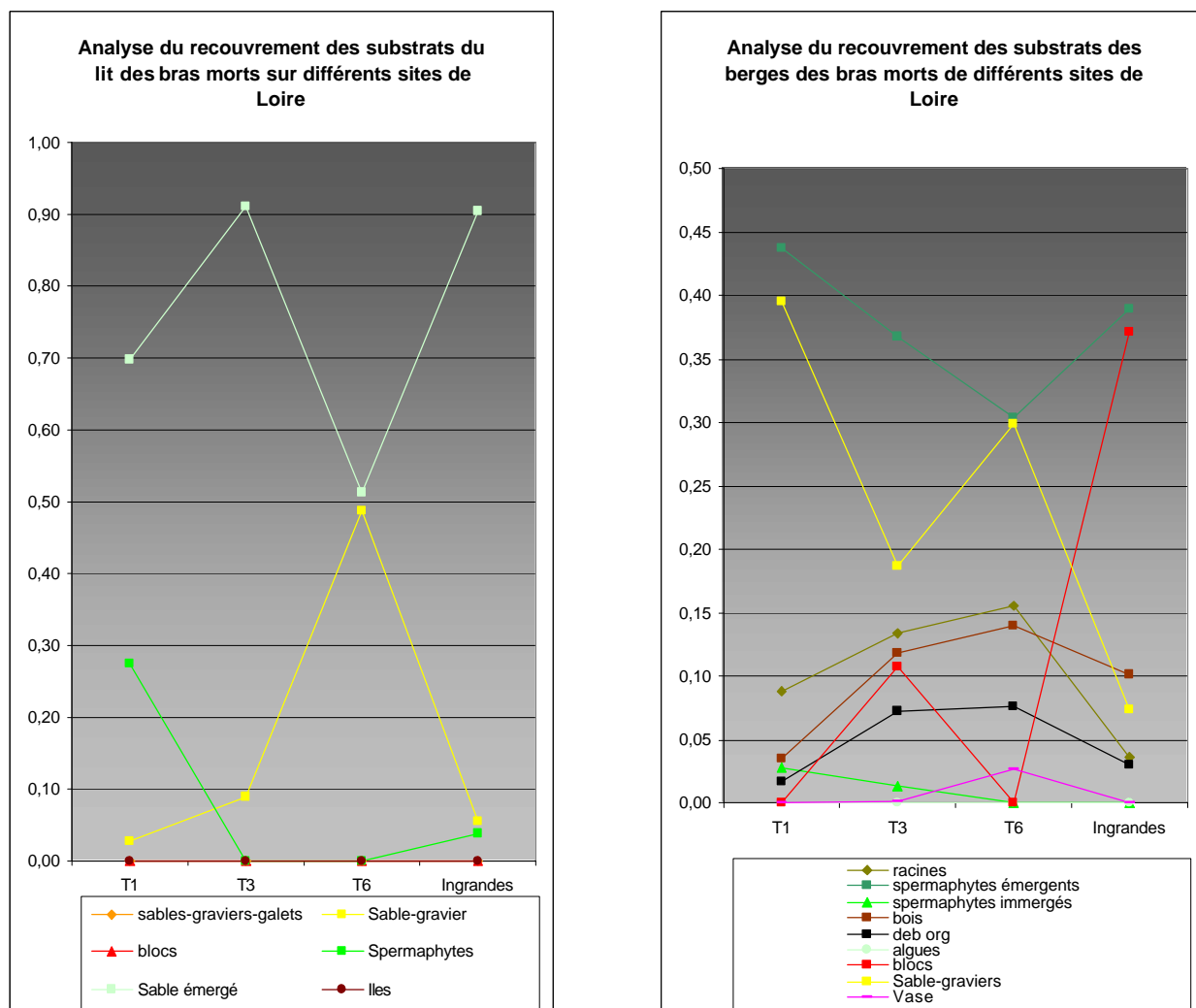


Figure 22 : Recouvrement de différents types de substrats dans les bras morts de quatre sites (T1, T3, T6 et site de Ingrandes) dans le chenal et sur les berges.

Ces variations sont liées essentiellement au recouvrement de la surface totale du bras par des surfaces en eau (importante par exemple pour le bras mort de la station T6 alors qu'il est très faible pour les bras des stations T1, T3, et pour le site d'Ingrandes). L'enrochement des berges des différents bras est aussi important sur le site de Ingrandes.

3. Modélisation biologique à l'étiage des différents sites

La modélisation biologique permet d'attribuer à différents sites de Loire, des scores faunistiques calculés à partir de la valeur biologique de différents habitats et de leur recouvrement à l'échelle stationnelle.

Cette analyse synchronique de comparaison de différentes stations ligériennes est conduite à deux niveaux :

- dans un premier temps, en considérant l'ensemble du site (lit principal et bras morts et berges et chenal) ;
- dans un deuxième temps, en n'analysant que le lit principal (car tous les sites de Loire analysés n'ont pas de bras morts).

3.1. Analyse globale des sites

3.1.1. Analyse des variables descriptives des peuplements

Les résultats des différents scores établis à partir de la structure des habitats sont présentés dans la figure 23 et dans le tableau X. Afin de permettre la comparaison des sites et des variables, chaque score a été rapporté à la surface totale et les valeurs exprimées en % de la valeur maximale observée sur les 7 sites analysés. Les scores varient donc de 0 à 100 (tableau) ou de 0 à 1 (figures).

	<i>Abondance</i>	<i>Richesse taxinomique</i>	<i>Richesse pondérée macro-habitats/micro-habitats(/ au % du nb total de taxons)</i>	<i>Richesse pondérée macro-habitats/micro-habitats(/ au % du nb spécifique de taxons)</i>	<i>Diversité de Margaleff</i>	<i>Diversité de Shannon</i>	<i>Equitabilité</i>
T1	99	94	92	63	97	96	91
T2	99	95	94	63	97	96	90
T3	100	100	100	84	99	98	89
T4	93	93	90	42	94	94	88
T5	84	87	85	42	98	98	94
T6	96	95	92	51	98	97	91
Ingrandes	91	84	85	100	100	100	100

Tableau X : Analyse comparée des scores des différentes stations ligériennes (en % par rapport à la valeur maximale enregistrée sur tous les sites analysés)

Comme nous pouvons le constater sur le tableau X et la fig. 23 on observe une situation contrastée entre les différents sites. Ainsi :

L'abondance :

Le score d'abondance potentielle est maximum sur les sites amont (sites T1 à T3) et moindre sur les sites aval avec une valeur beaucoup plus faible sur la station T5.

Le score d'abondance sur le site d'Ingrandes apparaît comme relativement moyen comparé aux sites amont (91 %)

La richesse taxinomique :

Le score de richesse taxinomique suit les variations observées avec l'abondance mais de façon plus marquée. La valeur la plus élevée est aussi obtenue pour la station T3.

La valeur du score de richesse taxinomique est aussi très moyenne pour le site de Ingrandes (84 % de la valeur maximale obtenue sur l'ensemble des sites)

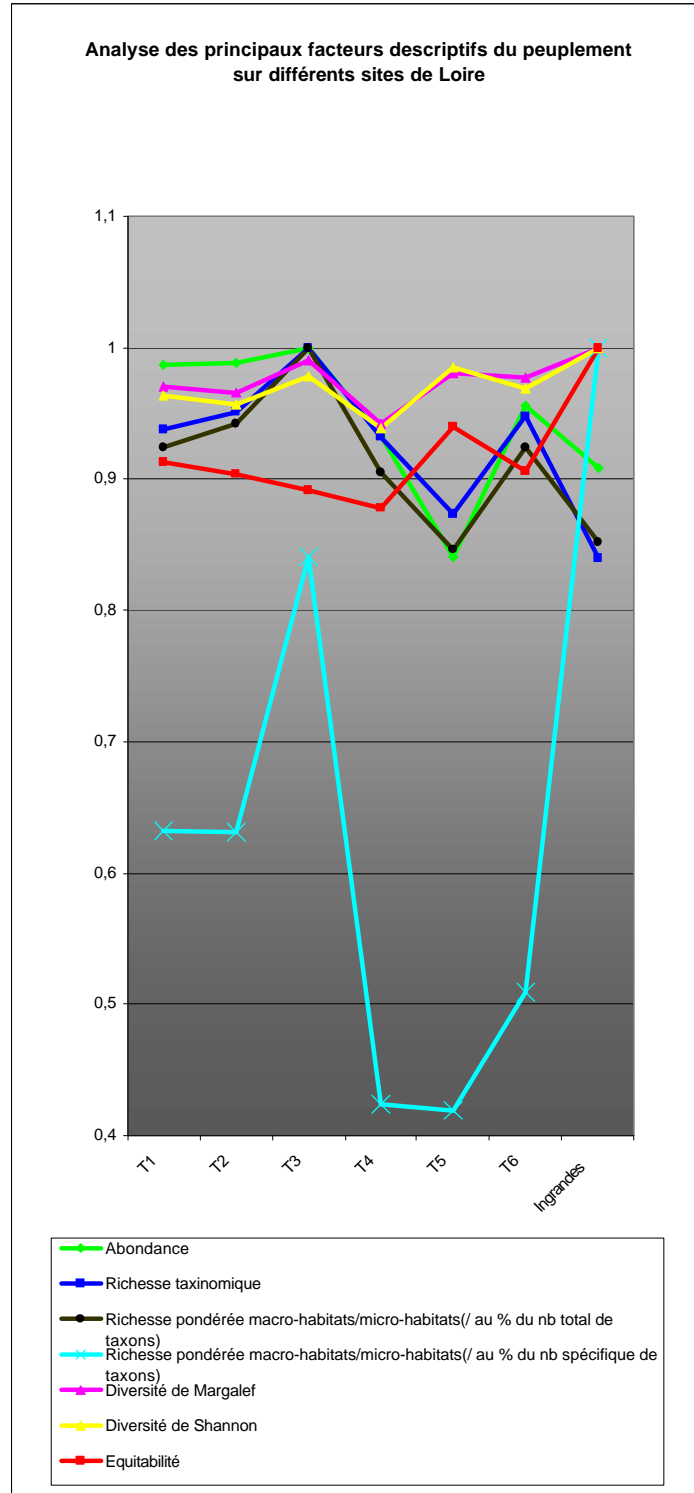


Fig. 23 : Analyse des scores des principaux facteurs décrivant les peuplements sur différents sites de Loire.

Richesse taxinomique pondérée par le nombre total de taxons présents dans les différents milieux ou habitats :

Les scores de richesse taxinomique pondérée en tenant compte du nombre maximum de taxons présents dans les différents milieu (macro-distribution) ou dans les différents habitats (micro-distribution) montrent une évolution similaire à celle observée précédemment. Cette diversité, qui rend mieux compte de l'occupation des niches écologiques par des peuplements différents, montre pour le site d'Ingrandes une faible valeur (85 %) qui traduit, d'une certaine manière, la simplification du milieu apportée par l'artificialisation.

Richesse taxinomique pondérée par le nombre de taxons spécifiques présents dans les différents milieux ou habitats :

La valeur obtenue avec cet indice est d'autant plus importante que le nombre de niches écologiques susceptibles d'être colonisées par des taxons sténotopes sera important. Là aussi, comme pour l'indice précédent, on observe une valeur minimale pour les stations les plus aval (T4 à T6). Toutefois le score est maximum pour la station d'Ingrandes (100 %). Comme nous le verrons en faisant l'analyse du seul chenal principal, cette forte valeur est attribuable à l'importante surface en eau dans le bras mort de Cul-de-Bœuf (surface importante à l'étiage comparée aux autres sites)

Les diversités de Shannon et de Margaleff:

Les scores pour les diversités de Shannon et de Margaleff suivent une même tendance sur les différents sites. L'évolution va dans le sens inverse de celle observée pour l'abondance. Les valeurs relatives des scores de diversité de Shannon et de Margaleff sur le site de Ingrandes sont importantes (100 %). Elles traduisent la prédominance sur ce site de substrats stabilisés qui favorisent la présence d'un peuplement à plus forte diversité (en comparaison avec des substrats instables de type sables et graviers en courant rapide). La stabilisation du lit et des berges imposée par les nombreux ouvrages de navigation explique là aussi cette valeur.

L'équitabilité :

Les scores d'équitabilité (rapport de la diversité observée sur la diversité maximale) varient dans le même sens que la diversité.

3.1.2. Analyse des peuplements

Cette première analyse des peuplements nous permet de différencier des sites dont les potentialités d'accueil pour différents peuplements apparaissent comme très différentes (toutes autres conditions mésologiques étant considérées comme constantes et notamment la qualité des eaux).

Il apparaît intéressant de vérifier si la valeur biologique que l'on peut attribuer de façon globale aux différents sites est la même pour les différents groupes taxinomiques qui constituent le peuplement.

Nous avons donc calculé les scores biologiques (variété et abondance) des groupes taxinomiques suivants : Plécoptères, Ephéméroptères, Trichoptères, Odonates et Coléoptères.

Les résultats sont présentés dans les figures 24 et 25 ci-après.

La situation globale apparaît très contrastée. Les sites présentant des bras morts (sites T1, T3, T6 et Ingrandes) favorisent incontestablement les Coléoptères et les Odonates. On remarque toutefois que le site de Ingrandes présente des valeurs biologiques plus faibles que les sites T1, T3 et T6 (abondance) ce qui prouve la faible valeur biologique

actuelle du bras de Cul-de-Bœuf (surface en eau à l'étiage faible par rapport à la surface totale, berges enrochées...)

D'une façon très générale, on peut constater que les résultats obtenus en prenant la variable abondance, sont plus marqués qu'avec la variété taxinomique notamment pour les Plécoptères, Ephéméroptères et les Trichoptères (EPT). Si les scores de la variété taxinomique globale des EPT suivent ceux du peuplement global - EPT, on remarque des écarts significatifs de l'abondance relative pour ces deux groupes sur les stations aval qui traduisent les moindres potentialités de ces sites pour les EPT.

Globalement le site de Ingrandes apparaît comme l'un des plus défavorable (nombre de taxons et nombre d'individus) pour de nombreux groupes taxinomiques et notamment les Ephéméroptères, les Plécoptères et les Trichoptères.

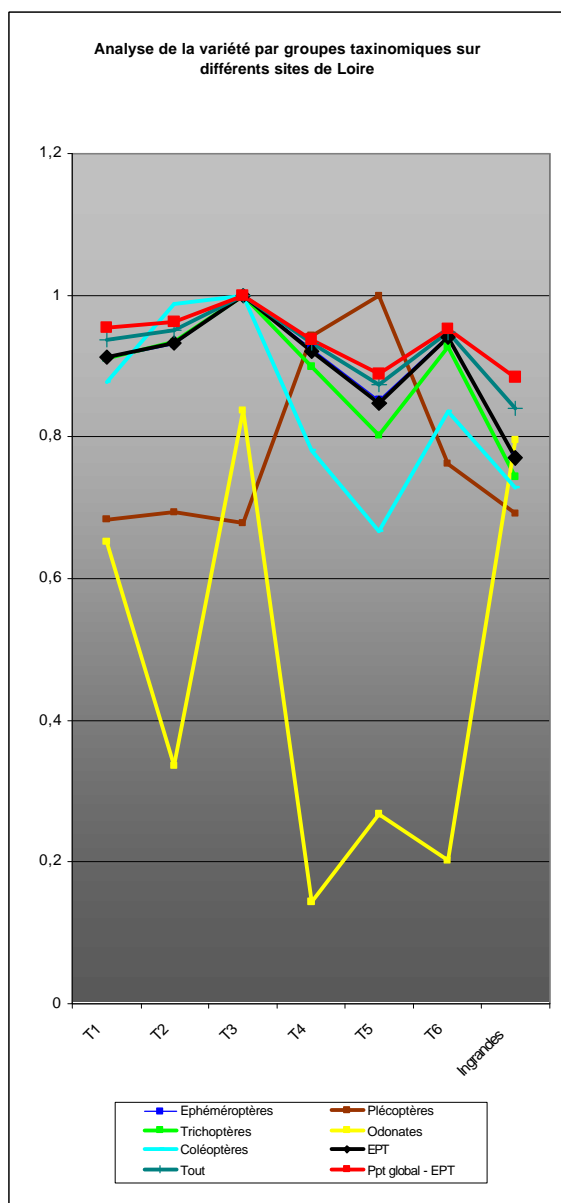


Fig. 24 : analyse des scores « variété » par groupes taxinomiques (lit vif et bras mort). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

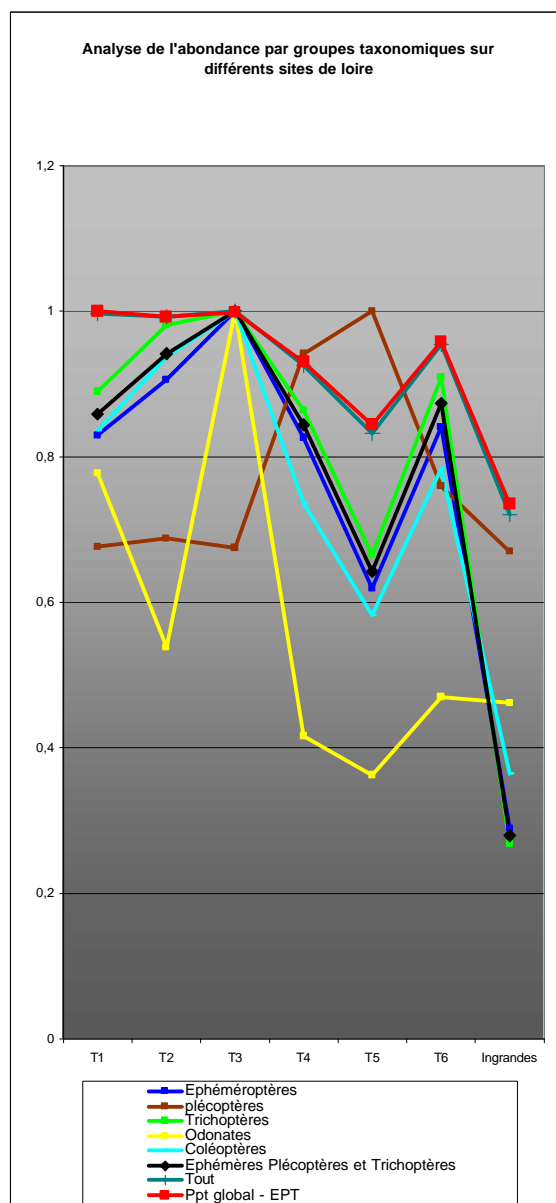


Fig. 25 : analyse des scores « abondance » par groupes taxinomiques (lit vif et bras mort). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

Plécoptères : le score maximum (variété et abondance) est obtenu sur la station T5. Toutefois le faible nombre de données dans la base de données de référence (Bréhémont et la Charité sur Loire) ne permet pas de conclure pour les taxons de ce groupe.

Ephéméroptères : les scores maxima de diversité et d'abondance sont atteints à la station T3 et les valeurs minimales sont enregistrées sur la station de Ingrandes (variété et abondance).

Trichoptères : ce groupe présente des scores comparables à ceux observés pour les Ephéméroptères. Les scores maxima de diversité et d'abondance sont atteints à la station T3 et la valeur minimale est enregistrée sur la station de Ingrandes (variété et abondance).

Coléoptères : les capacités d'accueil pour les Coléoptères sont faibles pour les différents sites dépourvus de bras morts. Le site qui apparaît comme le plus défavorable est le site T5 (variété) et le site de Ingrandes (abondance).

Odonates : comme pour les Coléoptères, ce groupe taxinomique est très lié aux annexes hydrauliques. Hormis sur les stations T1, T3 et Ingrandes les scores obtenus sont faibles. Le minimum est observé sur les stations T2, T4 et T6 (variété) et T4, T5, T6, Ingrandes (abondance).

EPT : les variations suivent celles observées pour les Ephéméroptères et les Trichoptères. La station d'Ingrandes a le plus faible potentiel.

Peuplement global sauf EPT : les sites qui apparaissent les plus favorables sont les sites T5 et Ingrandes pour la variété taxinomique et le site de Ingrandes pour l'abondance.

3.2. Analyse du chenal principal (lit vif et berges)

Les précédents résultats ont permis de mettre en évidence des différences importantes que l'on peut attribuer à la présence ou à l'absence de bras morts.

Afin de faire une comparaison plus objective des différents sites, il nous a paru opportun de présenter les résultats de la modélisation sur le seul chenal principal des différents sites.

Trois représentations graphiques ont été réalisées de la même façon que précédemment : analyse des différentes variables caractérisant le peuplement et analyse de la variété et de l'abondance de différents groupes taxinomiques.

3.2.1. Analyse des variables descriptives des peuplements

Comme on peut le constater sur la figure 26, les résultats obtenus sont beaucoup moins contrastés, notamment en ce qui concerne les diversité de Shannon et Margaleff et l'équitabilité. L'abondance est maximale sur la station T3 et minimale sur la station T5. La richesse taxinomique globale et la richesse taxinomique pondérée par rapport au nombre total de taxons présents dans les différents milieux ou habitats, sont maximales sur la station T3 et minimales sur la station Ingrandes.

Comme dans l'analyse précédente c'est la variété taxinomique pondérée par le nombre spécifique de taxons présents dans les différents milieux ou habitats qui apparaît la

plus discriminante. La valeur la plus forte est observée sur le site 2 et la plus faible sur le site d'Ingrandes. Les différences observées pour ce paramètre avec l'étude du site dans sa globalité nous démontre que ce paramètre est très lié aux annexes hydrauliques.

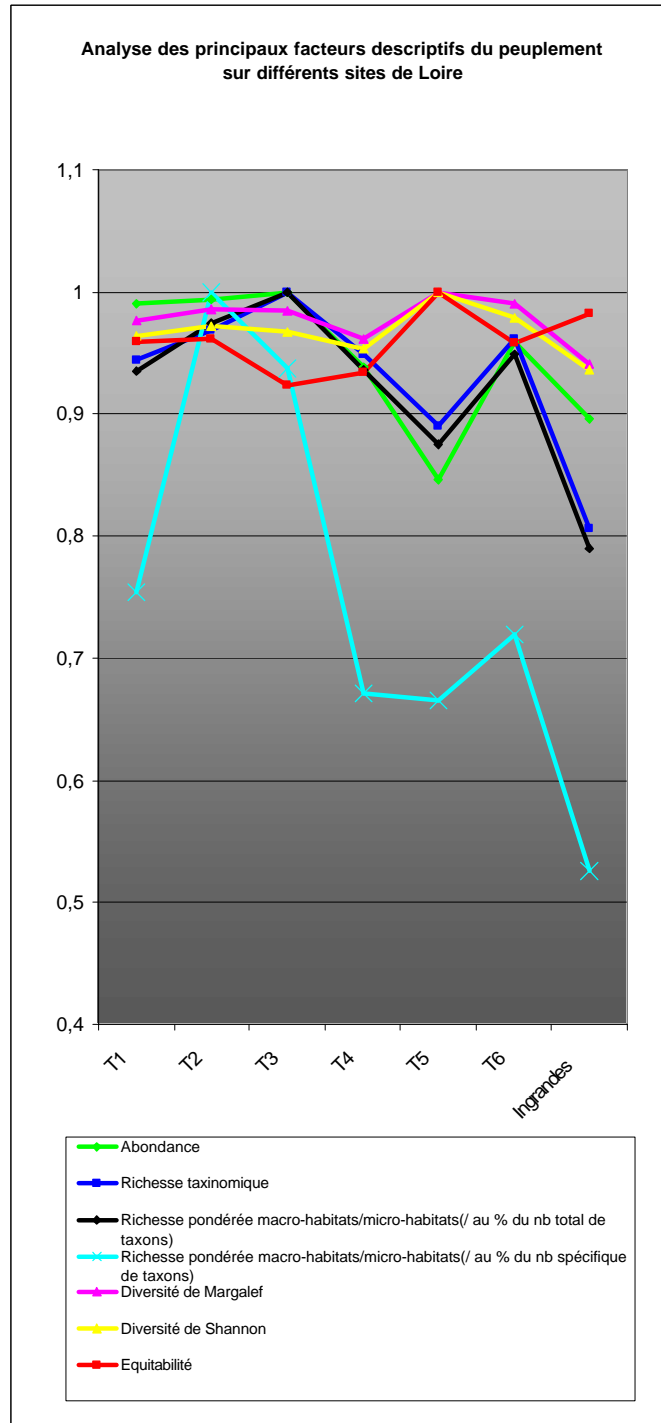


Fig. 26 : Analyse des scores des principaux facteurs décrivant les peuplements sur le chenal principal de différents sites de Loire. (Valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

3.2.2. Analyse des peuplements

Comme on peut le constater sur les figures 27 et 28 ci-dessous, les variations relatives des populations de Coléoptères et d'Odonates suivent, notamment pour l'abondance, les variations observées pour les autres groupes taxinomiques. Toutefois certains sites apparaissent beaucoup plus intéressant que d'autres pour les Odonates (cf. variété taxinomique des sites T2, T3 et T5)

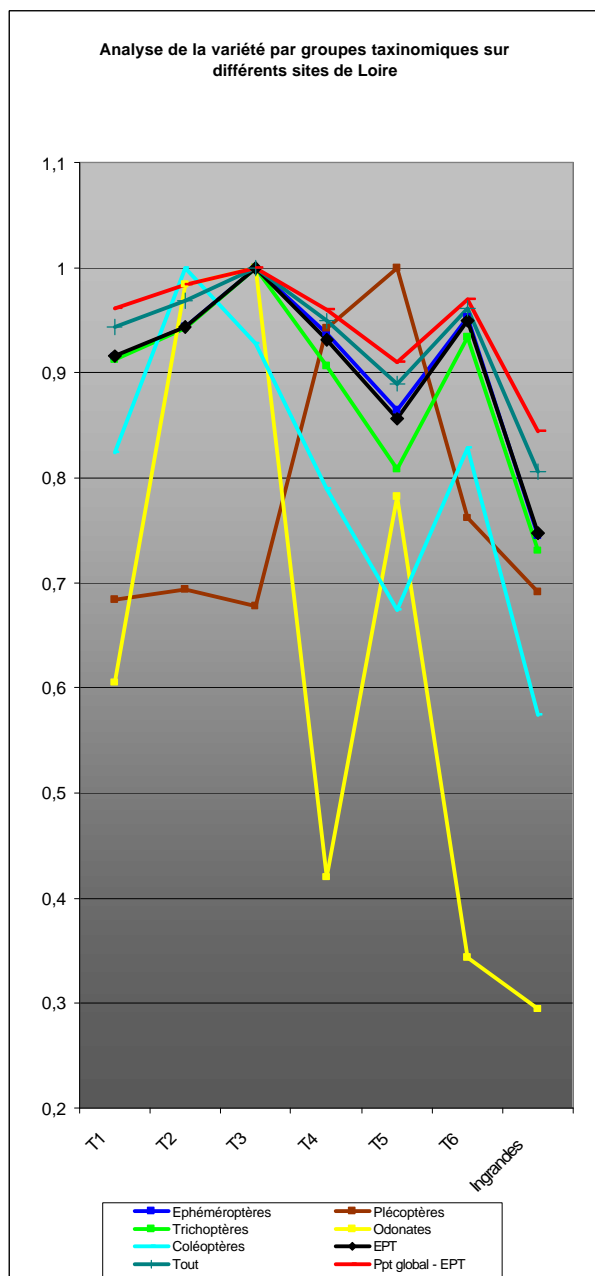


Fig. 27 : analyse des scores « variété » par groupes taxinomiques (lit vif seul). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

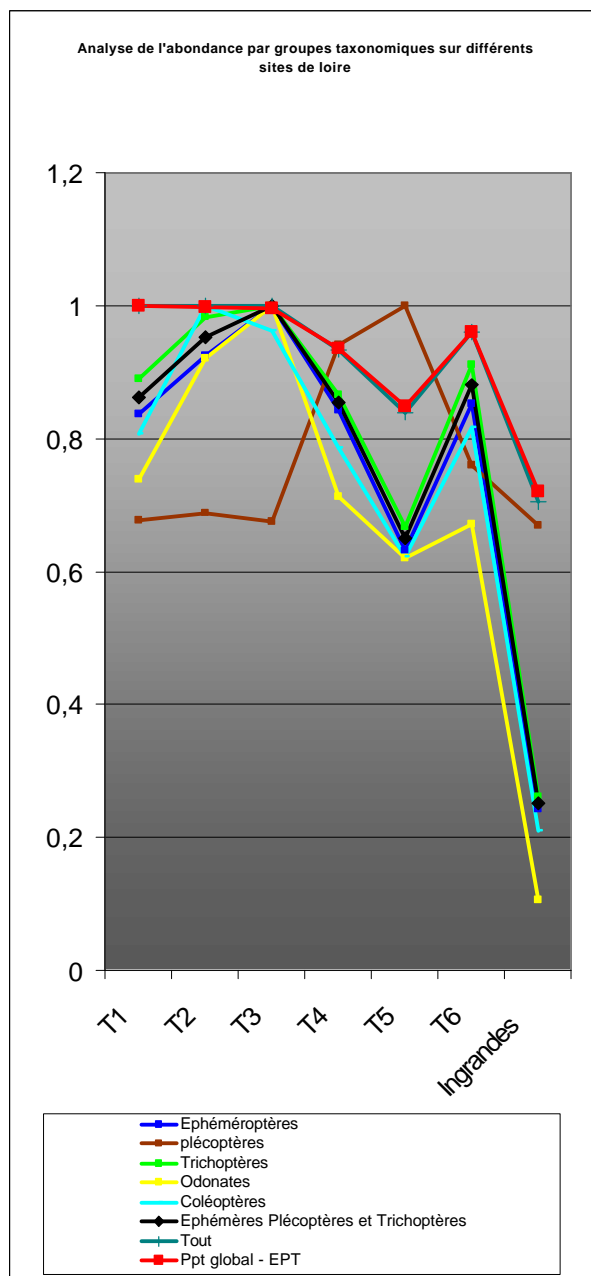


Fig. 28 : analyse des scores « abondance » par groupes taxinomiques (lit vif seul). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

Si les sites T2 et T3 présentent les plus fortes potentialités biologiques pour tous les groupes taxinomiques, le site d'Ingrandes obtient là encore les scores les moins bons et ce tant pour la variété taxinomique que pour l'abondance observée pour tous les peuplements.

4. Analyse comparée du site d'Ingrandes avant et après travaux

4.1. Les scénarii de modélisation

Pour pouvoir réaliser ce travail nous avons été obligés de construire différents scénarii de l'état du site après travaux. L'évolution du site n'étant pas décrite dans les études préliminaires, nous avons dû attendre qu'une partie des travaux soit réalisée de façon à estimer au mieux l'état du site in fine. Ceci afin de rentrer des données fiables dans le modèle biologique.

Les deux scénarii retenus prennent en compte l'état du site à court terme mais aussi à moyen terme.

A court terme (scénario 1 : **S1**) nous avons considéré que les épis n'avaient une action à l'étiage que dans le chenal principal. Le bras de Cul-de-Bœuf est alors alimenté de façon plus importante en période hivernale ce qui favorise le maintien en période estivale de plans d'eau dans le bras d'une surface environ deux fois supérieure à ce qu'elle est actuellement.

A moyen terme (scénario 2 : **S2**), nous avons considéré que les déflecteurs placés dans le chenal principal ont joués pleinement leur rôle (on prendra bien sûr pour hypothèse que ces ouvrages aient pu résister aux crues, qu'ils n'aient pas été contournés par érosion de la tête d'île...). Le bras de Cul-de-Bœuf est alors alimenté toute l'année. Il devient donc un chenal secondaire et non plus un bras mort.

4.2. Analyse du site après travaux

Différentes cartes ont été établies sur le site de Ingrandes (scénario S2). Elles sont représentées ci-dessous et les fichiers informatiques au format MAPINFO sont fournis dans le CD ROM joint.

Quatre représentations de l'état du site après travaux sont illustrées ici :

Fig. 29a : carte des substrats,

Fig. 29b : carte des vitesses de courant,

Fig. 29c : carte des couples substrat / vitesses de courant,

Fig. 29d : localisation des secteurs inventoriés en berge et localisation des ouvrages de navigation (épis...).

Les principales caractéristiques du site sont données dans les tableaux accompagnant les différentes cartes thématique :

4.2.1. Photos des ouvrages en cours de construction

Différentes photos des ouvrages en cours de construction ont été réalisées sur le site au cours de la campagne de repérage des habitats après travaux (11/10/2002).

Sur les 4 ouvrages prévus seul l'un d'entre eux était terminé. La base d'un deuxième étant aussi achevée nous avons pu déterminer les vitesses d'écoulement à l'amont et à l'aval des ouvrages en période d'étiage et la distance à partir de laquelle l'effet seuil se fait ressentir. Nous n'avons pas fait de nouvelles prospections de terrain pour ce qui concerne l'évolution sédimentologique du site car les travaux sont trop récents pour que des changements soient déjà nettement perceptibles (pas de crues morphogène).



Photo 7 : Vue de l'amont du site



Photo 8 : Vue de l'amont du site



Photo 9 : Vue de l'ouvrage en construction



Photo 10 : Vue de l'ouvrage en construction



Photo 11 : Vue de l'ouvrage en construction



Photo 12 : Vue de l'ouvrage en construction

4.2.2. Carte des substrats

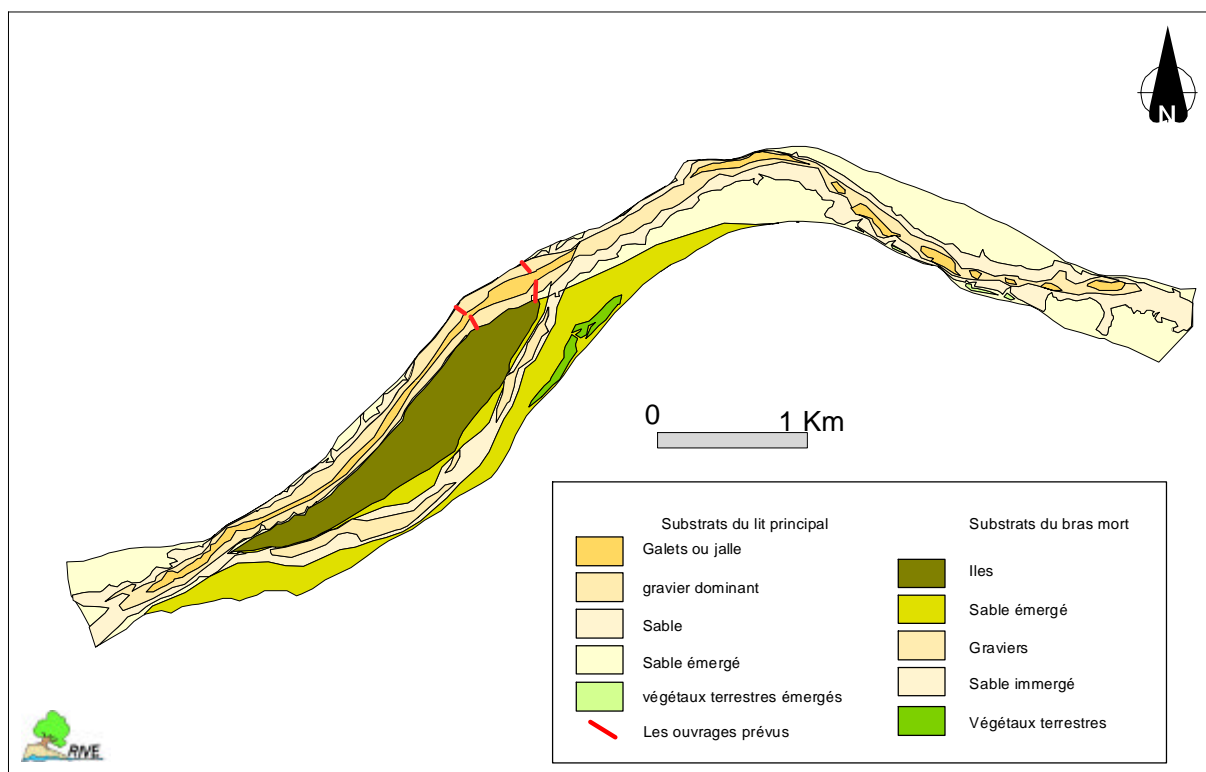


Figure 29a : carte des substrats sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux

		Sables graviers galets Immergés	Sables graviers Immergés	Sables immergés	Végétaux	Blocs	Sables émergés	Iles	Total
Avant travaux	Surface en Ha	29	52	85	5	3	248	69	490
	% par rapport à la surface totale	5,9 %	10,6 %	17,5 %	1 %	0,6 %	50,6 %	14 %	100 %
Après travaux S2	Surface en Ha	27	82	103	5	3	201	69	490
	% par rapport à la surface totale	5,5 %	16,7 %	21 %	1 %	0,6 %	41 %	14 %	100 %
Différence	Ha	- 2	+ 30	+ 18	0	0	- 47	0	
	%	- 0,4 %	+ 6,1 %	+ 3,5 %	0 %	0 %	- 9,6 %	0 %	

Tableau XIa : recouvrement de différents types de substrat sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux.

Les différences observées avant et après travaux concernent essentiellement :

- les sables et graviers et les sables immergés dont la surface augmente (respectivement de 6.1% et de 3.5%) notamment grâce à la remise en eau du bras de Cul-de-Bœuf,
- Les sables émergés dont la surface diminue au profit des surfaces immergées,
- Les sables-graviers-galets qui diminuent aussi car nous avons considéré que les vitesses de courant moins élevées dans la partie amont par effet seuil favoriseraient le recouvrement de la « jalle » par des dépôts sédimentaires de plus fine granulométrie.

4.2.3. Carte des vitesses de courant

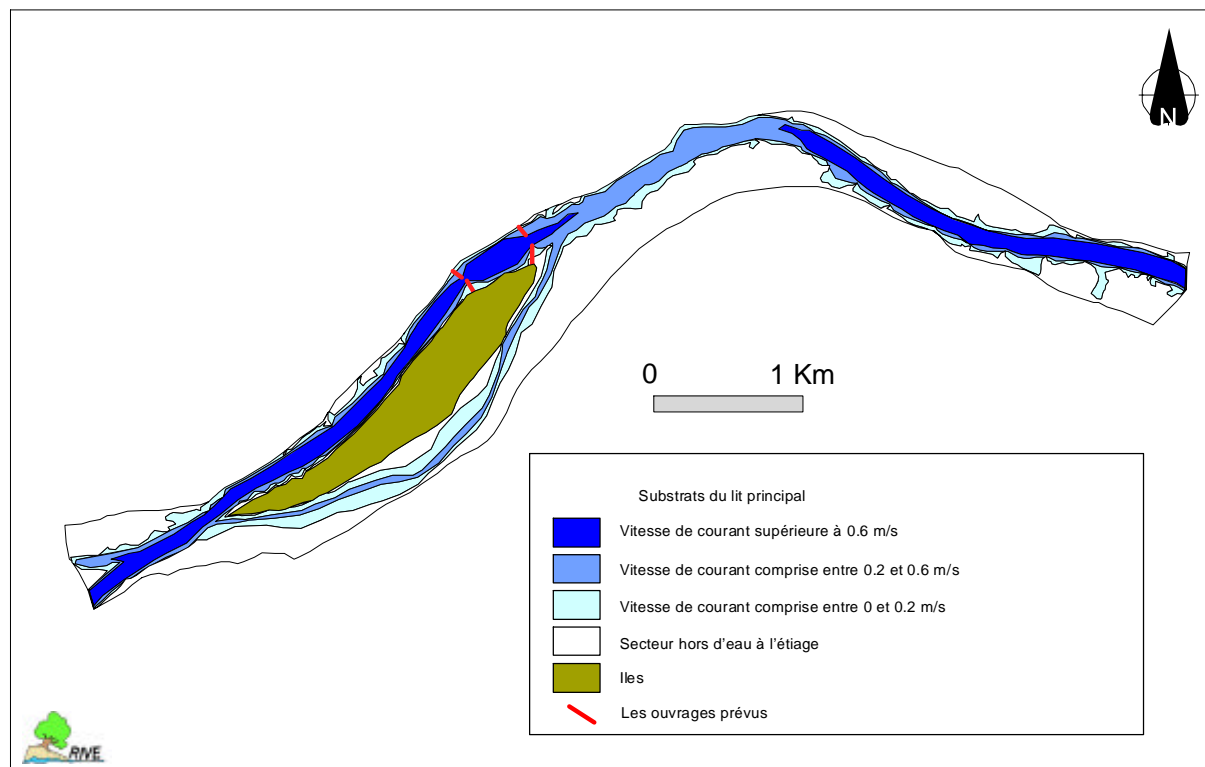


Figure 29b : carte des Vitesses de courant sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux

		V < 0.2 m/s	0.2 < V < 0.6 m/s	V > 0.6 m/s	Total
Avant travaux	Surface en Ha	51	32	89.5	172.5
	% par rapport à la surface totale	29.5 %	18.5 %	52.9 %	100 %
Après travaux S2	Surface en Ha	74,8	64,1	73.6	212,5
	% par rapport à la surface totale	35,2 %	30,2 %	34,6 %	100 %
Différence (Avant/après)	Surface en Ha	+ 23,8	- 1.8	- 15,9	
	% par rapport à la surface totale	+ 5,7 %	+ 11,7 %	- 18,3 %	

Tableau XIb : recouvrement de différents types des vitesses de courant sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux

Les travaux vont avoir pour effet une modification assez importante des champs de vitesse notamment à l'amont de l'ouvrage. Ces variations vont dans le sens d'une forte diminution de la surface où l'on peut observer des vitesses de courant rapides (supérieures à 0.6 m/s) alors que la représentativité des vitesses de courant moyennes et faibles va augmenter sur le site (+ 5.7 et + 11.7%). Notons que nous avons considéré dans le scénario S2 que les vitesses de courant dans le bras de Cul-de-Bœuf reconnecté ne dépasseraient pas 0.6 m/s.

4.2.4. Carte des couples substrat vitesse

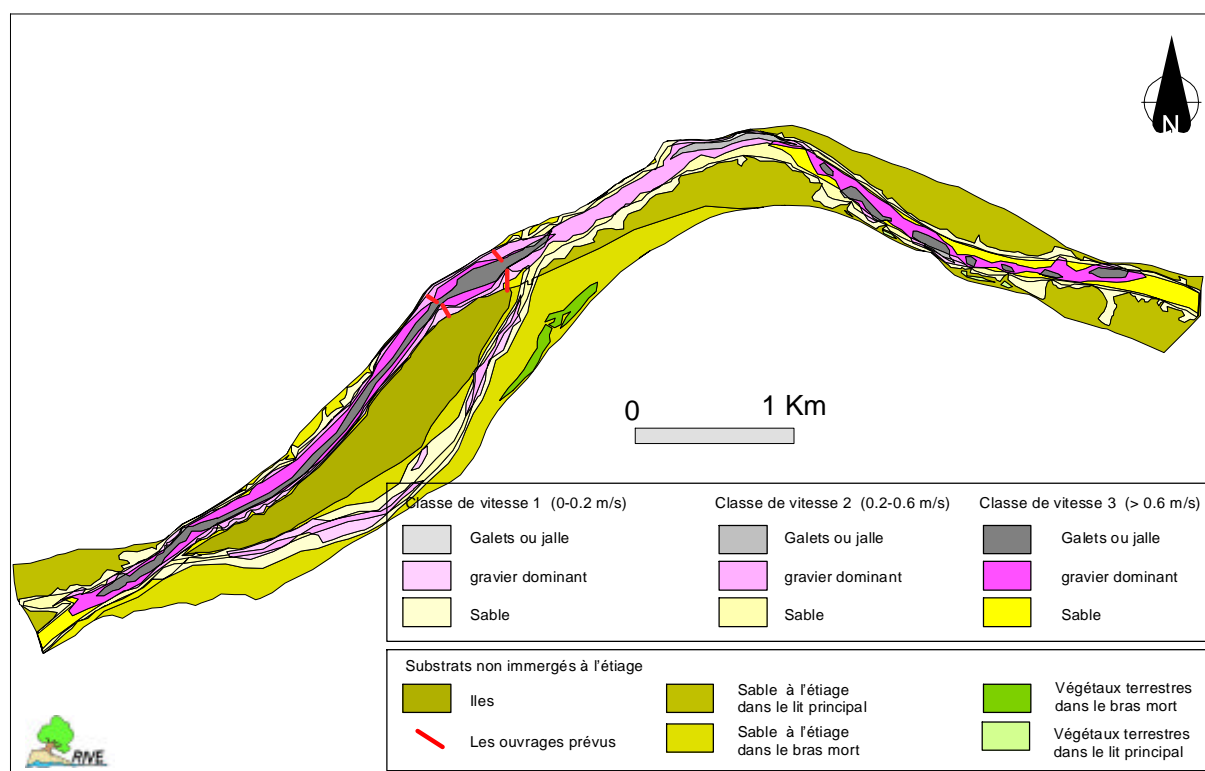


Figure 29c : carte des couples substrats/vitesse de courant sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux

	Lit Principal	Sables gravier galets Immergés	Sables gravier Immergés	Sables	Végétaux	Blocs immergés	Sables émergés	Gravier émergés	Total ha
Surface en Ha									
Avant	V < 0.2 m/s	0.77	4.6	38.41	0.69	0.37	128.6	11.73	185.2
travaux	0.2 < V < 0.6 m/s	2.6	8.75	20.61		0.92			32.9
	V > 0.6 m/s	25.2	38.5	25.85		0.65			90.2
Après	V < 0.2 m/s	0.56	7.2	37.2	0.69	0.37	121.4		167.4
travaux	0.2 < V < 0.6 m/s	3.7	28.2	22.9		0.92			55.7
S2	V > 0.6 m/s	22.61	32.6	18.4		0.65			74.3
Différence	V < 0.2 m/s	- 0.21	+ 2.6	- 1.21	0	0	- 7.2	- 11.73	- 17.8
Avant/après	0.2 < V < 0.6 m/s	+ 1.1	+ 19.45	+ 2.29		0			+ 22.8
Ha	V > 0.6 m/s	- 2.59	- 5.9	- 7.45		0			- 15.9

Tableau Xlc1 : recouvrement de différents habitats (couples substrat-vitesse dans le chenal principal du site d'Ingrandes. Etat après travaux

Comme nous pouvons le constater sur la figure 29c et dans le tableau Xlc1 ci-dessus, les couples substrat/vitesse dans le chenal principal dans des vitesses de courant supérieures à 0.6 m/s disparaissent au profit d'autres notamment dans la classe de vitesse 0.2-0.6 m/s. Ces vitesses de courant moyenne favorisent surtout les substrats sablo graveleux dont la surface augmente de plus de 19%.

Bras de Cul-de-Boeuf		Sables graviers Immergés (V < 0.2 m/s)	Sables immergés (V < 0.2 m/s)	Sables 0.2<V<0.6 m/s	Sables Graviers 0.2<V<0.6 m/s	Végétaux	Sables émergés	Graviers émergés	Total
Avant travaux	Surface en Ha	2.35	4.7	-	-	4.8	102	11.7	126
	%recouvrement	1.9 %	3.7 %	-	-	3.8 %	81 %	9.3 %	100 %
Après travaux	Surface en Ha	9	21.5	4	6	4.8	80	-	126
	%recouvrement	7.1 %	17 %	3.2 %	4.8 %	3.8 %	63.5 %	-	
Différence Avant/après	Surface en Ha	+ 6.65	+ 16.8	+ 4	+ 6	0	- 22	-11.7	
	%recouvrement	5.2 %	+ 13.3 %	+ 3.2 %	+ 4.8 %	0 %	- 17.5 %	- 9.3 %	

Tableau Xlc2 : recouvrement de différents substrats dans le bras de Cul-de-Bœuf sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux.

Dans le bras de Cul-de-Bœuf, du fait de la remise en eau par l'amont (transformation du « bras mort » en chenal secondaire), ce sont les sables et les sables-graviers dans la classe de vitesse inférieure à 0,2 m/s qui augmentent le plus.

4.2.5. Localisation des secteurs inventoriés en berge

Les épis sur le site de Ingrandes n'ont pas, en général, été modifiés par les travaux. Seuls les épis situés en tête de l'île de Cul-de-Bœuf ont été remplacés par les ouvrages destinés à rehausser la ligne d'eau à l'étiage. Nous avons considéré :

- que ces ouvrages prenant la place, pour une très grande partie, de dispositifs de chenalisation existants, il n'était pas nécessaire de modifier la représentativité quantitative (au demeurant faible par rapport à l'ensemble des ouvrages présents) des épis sur le secteur ;
- ne disposant pas de données sur le potentiel biologique de ce type d'ouvrage après travaux (à courte ou moyenne échéance), il ne semblait pas judicieux de les inclure dans la modélisation.

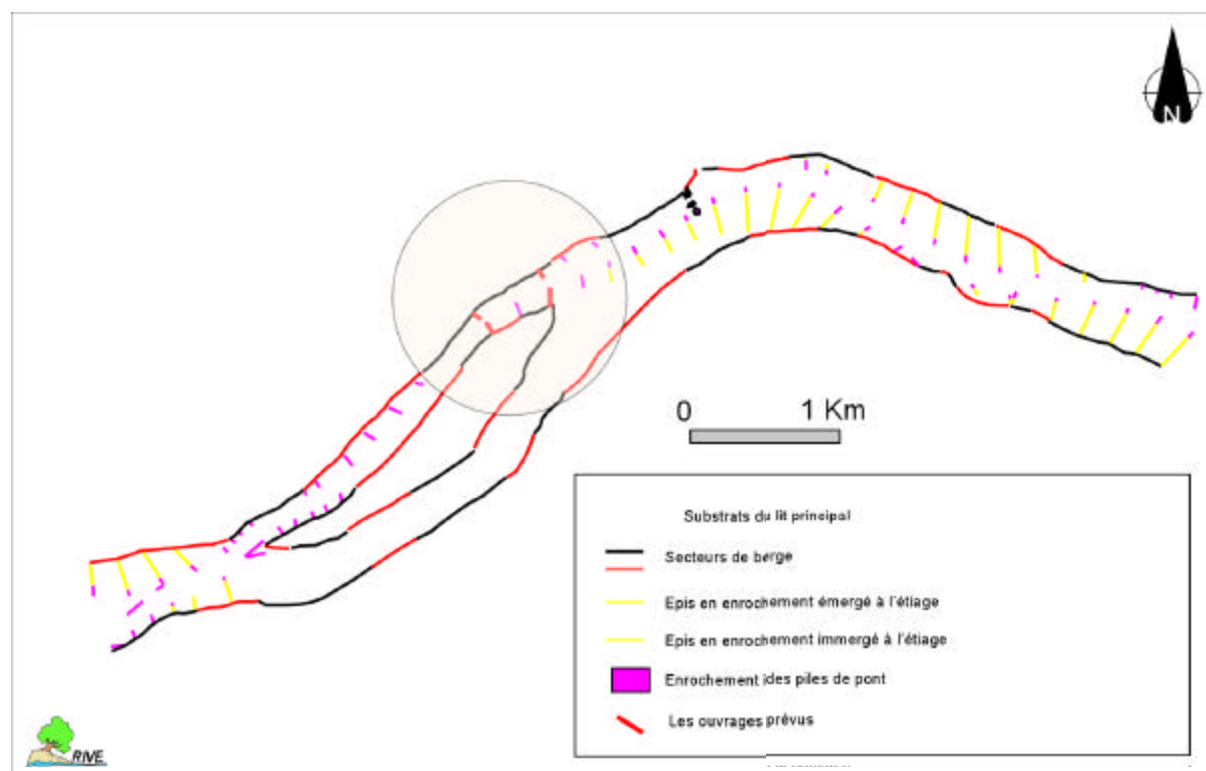


Figure 29d : carte des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux

De plus nous avons considéré dans ce travail que la physionomie générale du site resterait la même avant et après travaux (on pourrait par exemple penser que les ouvrages pourraient être contournés par érosion de l'île lors d'une crue de moyenne importance).

4.3. Analyse des scores macrobenthiques

La comparaison diachronique du site est rendue possible par une estimation de l'évolution des structures d'habitat avant et après travaux.

Nous présentons successivement les résultats en comparant les données obtenues avant travaux et celles obtenues avec les deux scénarii testés (S1 et S2).

Les valeurs brutes des scores avant travaux sont comparées aux valeurs des scores après travaux. Afin de permettre une meilleure comparaison, les données des scénarii 1 et 2 sont exprimées en % de la valeur obtenue sur le site avant travaux. Les résultats sont exprimés à surface égale car les scores obtenus pour chacun des scénarii (avant travaux, S1 et S2) ont été corrigés par la surface totale en eau.

4.3.1. Analyse des variables descriptives du peuplement.

Les résultats de la modélisation sont présentés dans le tableau XII ci-dessous.

	<i>Abondance</i>	<i>Richesse taxinomique</i>	<i>Richesse pondérée (% du nb total de taxons dans les milieux et les habitats)</i>	<i>Richesse pondérée (% du nb spécifique de taxons dans les milieux ou habitats)</i>	<i>Diversité de Margaleff</i>	<i>Diversité de Shannon</i>	<i>Equitabilité</i>	
Avant travaux	Valeurs brutes des scores calculés sur le site de Ingrandes avant travaux							
Lit vif	237123	1277	532	14	141	150	54	
Bras mort	4531	79	63	30	12	13	4	
Score total	241654	1356	595	44	153	163	58	
Après travaux	Valeur en % (par rapport à la situation avant travaux) des scores obtenus sur les deux scénarii de gestion proposés. (Données corrigées par rapport à la surface totale en eau pour chaque scénarii)							
S1	Lit vif	98,8	105,1	105,3	107,3	97,9	97,4	93,2
	Bras mort	162,6	152,5	152,5	152,5	157,9	158,4	164,5
	Score total	100,0	107,9	110,3	137,7	102,6	102,2	98,6
S2	Lit vif	101,3	112,2	113,4	133,4	104,3	104,4	99,9
	Score total	99,4	105,7	101,4	43,6	96,1	96,2	92,2

Tableau XII : Résultats des différents scénarii de modélisation sur le site de Ingrandes. Analyse des variables de description des peuplements.

Analyse du scénario 1 :

Comme on peut le constater, les travaux réalisés sur le site d'Ingrandes sont susceptibles d'apporter une amélioration de la qualité biologique globale du site. Ainsi, hormis pour l'équitabilité, on observe une augmentation globale du score total. Celle-ci est liée à l'amélioration de la connectivité du bras (doublement de la surface en eau à l'étiage) alors que la valeur biologique du chenal principal reste très semblable (légère décroissance des scores diversités, équitabilité et abondance, et sensible augmentation des scores variétés).

Analyse du scénario 2 :

Le scénario 2 (connexion totale du bras de Cul-de-Bœuf à l'étiage) semble plutôt défavorable. En effet et hormis pour la richesse taxinomique, les scores observés présentent tous des valeurs plus faibles que les valeurs initiales. On peut attribuer cette perte biologique à la disparition du « bras mort » qui est, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce document, très riche biologiquement.

4.3.2. Analyse des peuplements.

Les résultats de l'analyse des peuplements sont présentés dans le tableau XIII ci-dessous.

Score variété par groupes taxinomiques									Score abondance par groupes taxinomiques							
	Ephéméroptères	Plécoptères	Trichoptères	Odonates	Coléoptères	EPT	Tout	tout-ept	Ephéméroptères	plécoptères	Trichoptères	Odonates	Coléoptères	EPT	Tout	Trout-EPT
Avant travaux																
Lit vif	305,0	46,2	141,3	0,2	17,6	456,6	1276	818,6	1089	95,2	1058	0,4	11,7	2145	173054	172910
Bras mort	15,9	0,0	3,7	1,8	4,9	19,6	79	59,2	179	0	19	3,8	10,2	198	4743	4545
Score total	320,9	46,2	145,0	2,0	22,4	476,2	1355	877,8	1268	95,2	1078	4,2	21,8	2343	177798	177456
Après travaux																
S1 Lit vif	110	93	111	124	114	110	105	102	80	94	80	125	83	80	78	79
Bras mort	148	92	124	126	144	143	152	156	142	92	116	112	144	139	159	160
Score total	112	93	111	126	121	111	108	106	89	94	81	113	111	85	81	81
S2 Lit vif	117	135	115	363	126	116	112	110	83	138	73	394	120	78	78	78
Score total	111	135	112	34	98	112	106	102	71	137	72	39	64	71	76	76

Tableau XIII : Résultats des différents scénarii de modélisation sur le site de Ingrandes. Analyse des scores variété et abondance des différents groupes taxinomiques.

Analyse du scénario 1 :

Globalement, les scores variété pour tous les groupes taxinomiques augmentent de façon sensible. Toutefois, les scores d'abondance pour de très nombreuses espèces diminuent de façon très nette. Cette diminution d'abondance est particulièrement remarquable pour les taxons liés au chenal principal comme les Ephéméroptères, les Trichoptères et les Plécoptères. Les Odonates et les Coléoptères ont un score qui augmente, ce qui traduit l'amélioration de la qualité biologique du bras de Cul-de-Bœuf dans ce scénario.

Analyse du scénario 2 :

Dans ce scénario les scores de variété taxinomique pour de nombreux groupes vont en s'améliorant. C'est vrai pour tous les groupes sauf pour les Odonates et les coléoptères dont les scores variété diminuent considérablement car leur milieu de vie préférentiel (bras mort) a disparu dans ce scénario.

Le score d'abondance pour la plupart des groupes chute fortement. On remarque toutefois que le site deviendrait plus favorable pour les Plécoptères qui pourraient trouver dans le chenal secondaire des conditions plus favorables à leur développement.

4.4. Analyse comparée avec les sites de référence

Si les différents travaux prévus sur le site, et notamment le scénario 1, apportent une amélioration à l'état écologique actuel de l'habitat de la station de Ingrandes, il est intéressant de regarder si l'évolution prévisible est susceptible de replacer ce site dans un état biologique comparable avec les sites amont.

Comme on peut le constater sur les figures 30 et 31 les effets prévisibles des travaux, bien que significatifs, ne permettent pas de retrouver un potentiel faunistique comparable à ceux des stations analysées entre le Bec de Vienne et Les Ponts de Cé. C'est particulièrement remarquable pour les scores d'abondance des différents taxons qui restent avant et après travaux très faibles pour l'ensemble des groupes taxinomiques analysés.

Il est bien sûr assez difficile de déterminer, parmi les nombreuses variables qui interviennent dans la structuration des peuplements à l'échelle stationnelle, quel est celui qui « explique » le mieux cette situation. On peut toutefois raisonnablement supposer que l'extrême chenalisation du lit imposée par les ouvrages de navigation ainsi que la pauvreté des habitats de berge liée aux protections sont à l'origine de cette apparente « pauvreté » biologique. Il serait d'ailleurs facile de le vérifier en modélisant le fonctionnement de cette station où l'on supprimerait, en tout ou partie, ces différents ouvrages.

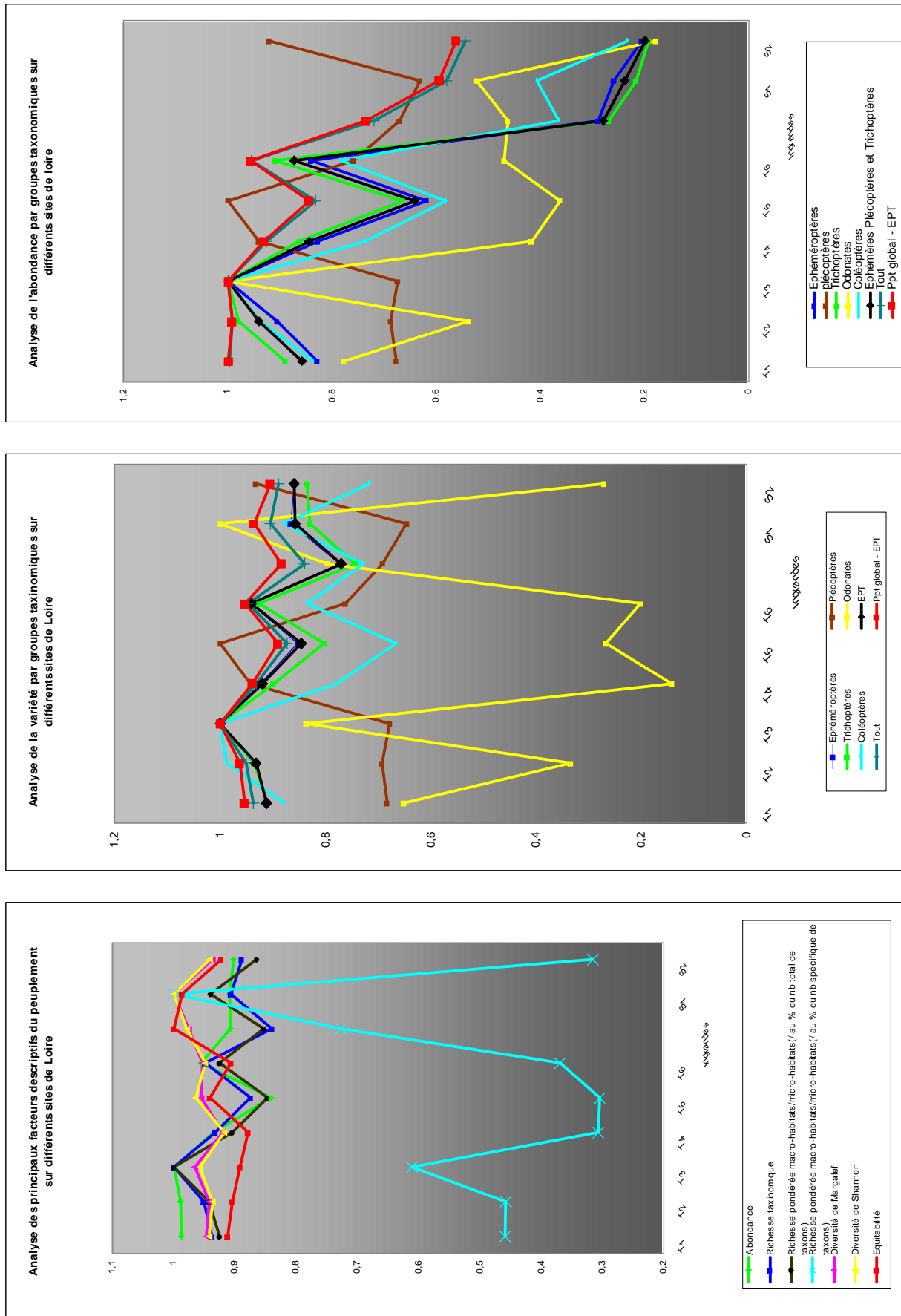


Fig. 30 : Analyse comparative des scores des différents sites de Loire et du site de Ingrandes avant et après travaux : analyse chenal principal et bras mort (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

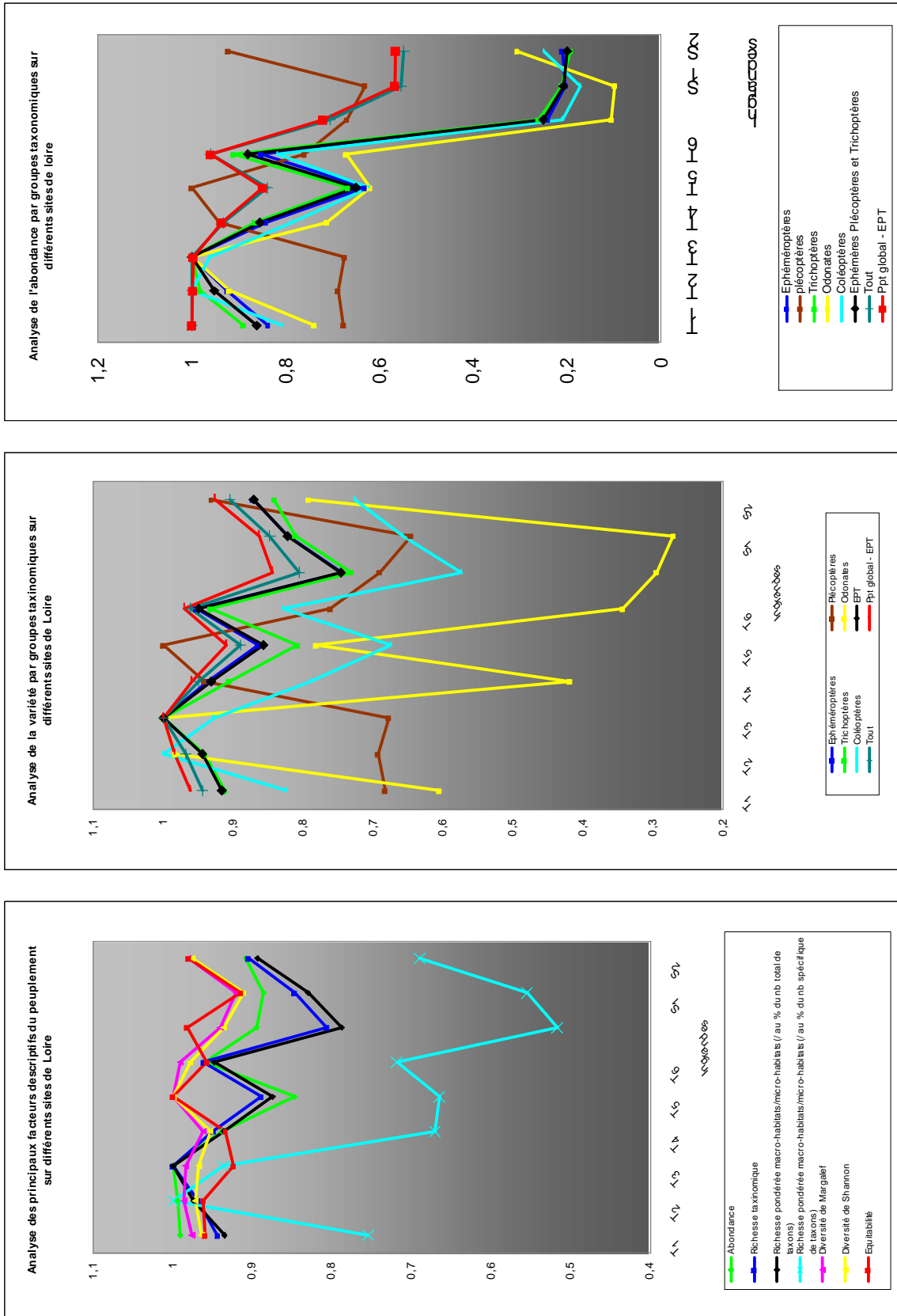


Figure 31 : Analyse comparative des scores des différents sites de Loire et du site de Ingrandes avant et après travaux : analyse chenal principal et bras mort. (Valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)

Conclusion



Conclusion

Ce travail réalisé particulièrement sur le site de Ingrandes mais aussi sur différents sites de la Loire moyenne a permis, grâce à l'utilisation de sites de référence parfaitement connus (La Charité sur Loire et Bréhémont), de déterminer à l'aide du calcul d'un « score » la potentialité biologique de différents sites ligériens.

Le calcul du score prédit l'évolution possible des différentes communautés macrobenthiques sur le site en fonction de l'évolution des différentes structures d'habitat (lit vif / bras mort, substrat / vitesse).

Il est bien entendu important de noter que les scores obtenus ne représentent que les **potentialités** biologiques globales d'un site et que celles-ci peuvent être profondément altérées par des facteurs s'exerçant à une dimension plus grande comme la pollution des eaux. De plus, ce score ne prend pas en compte les modifications de paramètres mésologiques liés aux travaux (modification de la chimie des eaux pendant les travaux et après par ralentissement des vitesses de courant et effet seuil...). Ce travail ne peut donc constituer à lui seul une étude d'impact, mais en est l'un des éléments constitutifs.

La validité de ce travail sur la modélisation biologique des habitats a été testée sur le groupe taxinomique que représente les Naïades d'eau douce entre le Bec de Vienne et les Ponts de Cé (Bacchi, Moriette, 2002). Comme on peut le constater sur la figure 32 ci-dessous, on note une nette relation entre les scores d'abondance, de richesse et de diversité et le nombre d'Unionidés présents sur le même secteur géographique.

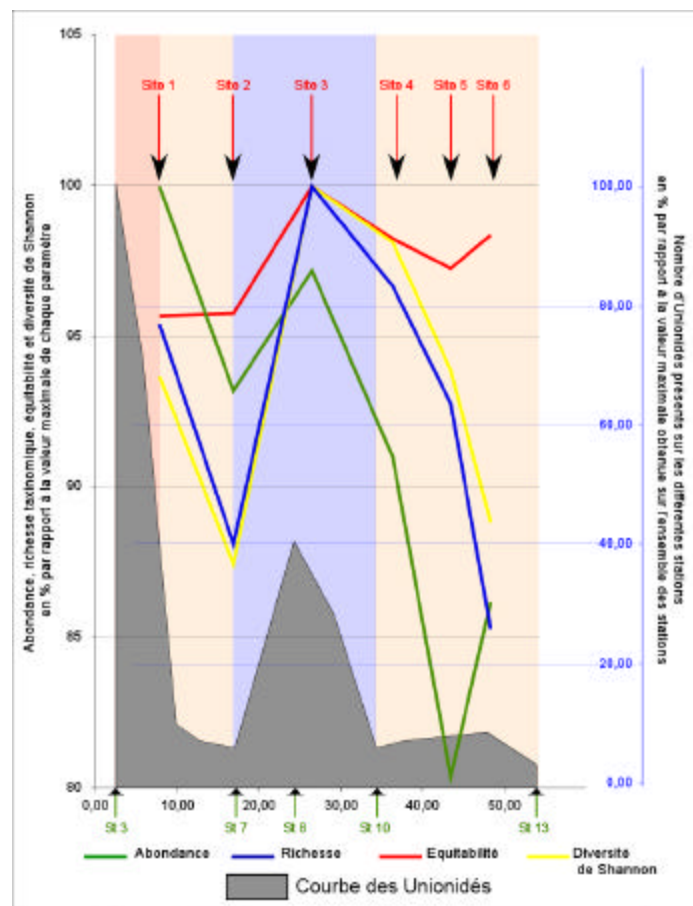


Fig. 32 : Evolution des scores d'abondance, de diversité, de richesse et d'équitabilité sur les sites et évolution de l'abondance des Unionidés entre le Bec de Vienne et les Ponts de Cé.

Si la modélisation donne des résultats intéressants, elle pourrait toutefois être améliorée de différentes façons :

- en complétant la base de donnée initiale (950 prélèvements) par d'autres données en provenance d'autres sites de la Loire Moyenne (sites de référence par exemple) ;
- en caractérisant de façon spécifique les peuplements colonisant les ouvrages anthropiques suivant leur nature (type d'ouvrage, date de construction...). En effet, ceux-ci sont assimilés, faute de données, à des éléments naturels (blocs naturels). Ce défaut de caractérisation des ouvrages est certainement préjudiciable car elle surestime vraisemblablement la valeur biologique des sites fortement anthropisés. De plus, il paraît essentiel, dans une modélisation, de prendre en compte, très précisément, le potentiel biologique à court, moyen ou long terme des principales structures pouvant interférer sur la qualité des habitats.

L'analyse comparative du site d'Ingrandes avec d'autres stations ligériennes fait apparaître des différences importantes dans la valeur biologique de ce secteur de Loire dont le potentiel biologique apparaît faible comparé aux autres stations. Les raisons de ces différences sont nombreuses et complexes. Citons comme éléments les plus déterminants, la modification de la géomorphologie locale, les modifications des conditions hydrauliques qui en découlent, mais aussi, et l'un est la conséquence de l'autre, de nombreux ouvrages en berge (enrochement) et dans le lit (épis).

Afin de prévoir l'impact des travaux sur le site, deux scénarii ont été testés. Si les deux permettent de prévoir une amélioration notable de la qualité du site, il s'avère toutefois que la valeur biologique maximale serait obtenue avec une reconnexion partielle du bras de Cul-de-Bœuf lui permettant de conserver son statut de « bras mort ».

La potentialité biologique du site de Ingrandes restera toutefois inférieure à celle observée sur des stations plus amont du fait de l'artificialisation importante du milieu (enrochements en berge et nombreux ouvrages de navigation).

Une telle étude est nécessaire pour comprendre et analyser le fonctionnement des hydrosystèmes potamiques (mais cette technique pourrait être appliquée à des écosystèmes plus modestes), et elle apparaît comme un complément indispensable pour interpréter et analyser tout relevé faunistique en grands cours d'eau.

Elle apparaît aussi, au travers de l'étude réalisée sur le site de Ingrandes, comme un outil intéressant d'aide à la décision. En permettant la comparaison de plusieurs scénarii d'aménagements qui pourraient modifier les caractéristiques physiques de l'hydrosystème, elle permet, sans aucun doute, de mieux orienter les choix méthodologiques dans la phase « conception » de tout projet de gestion et d'aménagement.

L'utilisation d'une telle méthode permettrait aussi une meilleure comparaison synchronique en relativisant, dans un sens ou dans l'autre les Indices de Qualité Biologique (IBGN) obtenus en amont et en aval d'une perturbation.

Bibliographie citée

- Amoros, C., Richardot-Coulet, M., Pautou, G. (1982) - Les « ensembles fonctionnels »: des entités écologiques qui traduisent l'évolution de l'hydrosystème en intégrant la géomorphologie et l'anthropisation (exemple du Haut-Rhône français. Revue de Géographie de Lyon 1, 50-62.
- Amoros, C., Roux, A.L., Reygrobellet, J.L., Bravard, J.P., Pautou, G. (1987) - A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. Regulated rivers. 1, 17-36.
- Anderson, R.V., Day, M. (1986) - Predictive quality of macroinvertebrate-habitat associations in lower navigation pools of the Mississippi River. Hydrobiologia 136, 101-112.
- Bacchi, M., (2000) : Structure et dynamique des peuplement macrobenthiques en Loire ; Impact des facteurs hydrologiques et sédimentaires. Thèse de Doctorat. Univ. de Tours, 251 p.
- Bacchi, M., Moriette, P.A., (2002) : Cartographie des habitats macrobenthiques de la Loire. Description de six secteurs retenus au titre de la Directive Habitat Natura 2000. RIVE-PNR Loire-Anjou-Touraine, 57 p.
- Bacchi, M., Moriette, P.A., (2002) : Les Naïades de la Loire et de la Vienne. RIVE-PNR Loire-Anjou-Touraine, 70 p.
- Becker, G. (1994) - Food preference by five trichopteran scrapers. Hydrobiologia 273, 171-178.
- Beisel, J.N. (1996): Microrépartition des invertébrés benthiques en eau courante: caractéristiques des microhabitats et organisation de leurs peuplements. Thèse de 3° cycle. Université de Metz, 242 p.
- Brossé, R. (1982) - Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire. Thèse Doct. Etat, Angers, 350p.
- Chessel, D., Thioulouse, J., Dolédec, S., Olivier, J.M. (1993): Software. Multivariate Analysis and graphical display for environmental data. Version 4. HyperCard stacks and program library for the analysis of environmental data. U.R.A. C.N.R.S.1451 'Ecologie des Eaux Douces et des Grands Fleuves'. Université Claude Bernard Lyon 1 France.
- Cogerino, L. (1989). Les rives aquatiques de grands cours d'eau: Caractérisation mésologique et faunistique. These 3° cycle. Université Claude-Bernard Lyon I. 369 p.
- Cummins, K.W., Lauff, G.H. (1969) - The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macro benthos. Hydrobiologia, 34 (2), 145-181.
- Ferry, C., Frochot, B. (1970) - L'avifaune nidificatrice d'une forêt de Chênes pédonculés en Bourgogne : étude de deux successions écologiques. La terre et la vie 24, 153-250.
- Hynes, H.B.N. (1970) - The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool, 555p.
- Hynes, H.B.N. (1970) - The ecology of running waters. Liverpool University Press, 555p.
- Hynes, H.B.N. (1977) - A key to the Adults and nymphs of british stoneflies (Plecoptera). Fresh. Biol. Ass. Scientific publication N°17. 90 p.
- Iversen, T.M. (1974) - Ingestion and growth in *Séricostoma personatum* (Trichoptera) in relation to the nitrogen content of ingested leaves. Oikos 25 (3), 278-282.
- Lapchin, L. (1977) - Micro répartition des invertébrés benthiques dans deux ruisseaux à salmonidés de Bretagne. Ann. Hydrobiol. 8 (3), 319-332.
- Lapchin, L., Roux, C. (1977) - Utilisation de l'analyse des correspondances pour l'étude de la répartition des invertébrés benthiques dans un ruisseau à Salmonidés de Bretagne. Ann. Hydrobiol. 8 (3), 333-354.
- Peeters, E.T.H., Tachet, H. (1989) - Comparison of macrobenthos in braided and channelized sectors of the Drôme river, France. Regulated rivers : Research & management, 4, 317-325.
- Prodon, R. (1976) - Le substrat, facteur écologique et éthologique de la vie aquatique : observations et expériences sur les larves de *Micropterna testacea* et *Cordulegaster annulatus*. Thèse de 3° cycle. Lyon I, 221p.
- Reineck, H.E., Singh, I.B (1980) - Depositional sedimentary environments. Springer Verlag, Berlin, 549p.

Table des matières

Introduction	4
1.1. Présentation	4
I^{ère} partie Présentation méthodologique	6
2. Analyse des habitats aquatiques : problématique	7
2.1. Rappels et définitions	7
2.1.1. Les facteurs de macro-distribution	7
2.1.2. Les facteurs de micro-distribution	8
2.2. Les habitats aquatiques sur deux sites référence : La –Charité-Sur-Loire et Bréhémont	9
2.2.1. Présentation des sites de référence	9
2.3. Distribution faunistique en fonction de facteur de macro-distribution	11
2.3.1. Distribution spatiale et temporelle de la macrofaune benthique	11
2.3.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents types de milieux rencontrés.	12
2.3.3. Analyse de la disparité stationnelle dans le lit vif	12
2.4. Distribution faunistique en fonction de facteur de micro-distribution	13
2.4.1. Analyse de la richesse taxinomique par type de substrat	13
2.4.2. Analyse de la spécificité taxinomique des différents substrats analysés	14
2.4.3. Analyse du peuplement en fonction des substrats et des vitesses de courant	15
3. Caractérisation de la structure des peuplements des sites de référence	17
3.1. Les peuplements en fonction des facteurs de macro-distribution	17
3.2. Les peuplements en fonction des facteurs de micro-distribution	18
3.2.1. Analyse de l'abondance, de la richesse taxinomique, de la diversité de Shannon et de l'équitabilité pour chaque type d'habitat	18
3.2.2. Analyse de la variété taxinomique moyenne des différentes populations ligériennes	20
4. La modélisation de l'écosystème ligérien : Principe et méthode	24
4.1. Les variables analysées	24
4.1.1. Les facteurs de macro-distribution	24
4.1.2. Les facteurs de micro-distribution	24
4.1.3. Les groupes faunistiques	24
4.1.4. Les variables faunistiques analysées	24
4.2. Méthodologie	25
4.2.1. Méthode de calcul des surfaces et mode de représentation cartographique	25
4.2.2. Détermination de la valeur biologique potentielle des sites	27
II^{ème} partie Analyse du site d'Ingrandes	29
1. Présentation du site	30
1.1. Présentation cartographique du site d'Ingrandes	32
1.1.1. Carte des substrats	32
1.1.2. Carte des vitesses de courant	33
1.1.3. Carte des couples substrat vitesse	34
1.1.4. Localisation des secteurs inventoriés en berge	35
2. Approche comparée du site d'Ingrandes avec d'autres sites de Loire	37
2.1. Analyse globale des différents sites	38
2.1.1. Les facteurs de micro-distribution de l'ensemble du chenal	38
2.1.2. Les facteurs de micro-distribution en berge	38
2.2. Analyse des annexes hydrauliques (bras morts) des différents sites analysés	39
3. Modélisation biologique à l'étiage des différents sites	41
3.1. Analyse globale des sites	41
3.1.1. Analyse des variables descriptives des peuplements	41
3.1.2. Analyse des peuplements	43
3.2. Analyse du chenal principal (lit vif et berges)	45
3.2.1. Analyse des variables descriptives des peuplements	45
3.2.2. Analyse des peuplements	47
4. Analyse comparée du site d'Ingrandes avant et après travaux	49
	64

4.1.	Les scénarii de modélisation _____	49
4.2.	Analyse du site après travaux _____	49
4.2.1.	Photos des ouvrages en cours de construction _____	49
4.2.2.	Carte des substrats _____	51
4.2.3.	Carte des vitesses de courant _____	52
4.2.4.	Carte des couples substrat vitesse _____	53
4.2.5.	Localisation des secteurs inventoriés en berge _____	54
4.3.	Analyse des scores macrobenthiques _____	55
4.3.1.	Analyse des variables descriptives du peuplement. _____	55
4.3.2.	Analyse des peuplements. _____	56
4.4.	Analyse comparée avec les sites de référence _____	57
	Conclusion _____	60

Table des figures, des tableaux et des photos

Liste des figures

Fig. 1 : Présentation schématique d'un site de Loire	8
Fig. 2 : Localisation des sites de La-Charité-Sur-Loire et Bréhémont dans le bassin versant de la Loire	9
Fig. 3 : Répartition de la macrofaune benthique sur deux sites de Loire en fonction des facteurs de macro-distribution	11
Fig. 4 : Répartition taxinomique sur les berges et au centre du lit vif sur le site de Bréhémont au cours de l'année 1996	12
Fig. 5 courbes des richesses cumulées des substrats analysés sur le site de Bréhémont en Indre et Loire en 1996	14
Fig. 6 : Présentation de différents indices (abondance, variété, diversité, équitabilité, taxons spécifiques) caractérisant les couples substrat-vitesse sur les sites de Bréhémont et de la Charité sur Loire (toutes stations confondues).	16
Fig. 7 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité dans le lit vif, les bras morts et les boires. dans le lit vif les bras morts et les boires	17
Fig. 8 Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques dans le lit vif les bras morts et les boires	17
Fig. 9 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité selon la nature du substrat	19
Fig. 10 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité selon la vitesse de courant.	19
Fig. 11 : Evolution de l'abondance, la diversité, la richesse et l'équitabilité en fonction de la nature des substrats	20
Fig. 12 : Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques pour différents substrats	21
Fig. 13 : Richesse taxinomique moyenne des principaux groupes faunistiques pour différentes vitesses de courant.	21
Fig. 14 : Evolution de la richesse taxinomique des principaux groupes faunistiques en fonction de la nature du substrat et des vitesses de courant	22
(En abscisse la nature des substrats, en ordonnée % par rapport à la valeur maximale de chaque substrat toutes vitesses confondues)	22
Fig. 15 : cartographie du lit de la Loire à l'été.	26
Figure 16 : cartographie du lit de la Loire hors de la période d'été.	26
Fig. 17 : Méthode utilisée pour la détermination de la surface de chaque substrat en berge.	27
Fig. 18 Carte de localisation du site d'Ingrandes où les habitats macro-benthiques seront caractérisés (IGN 1 :125000)	30
Fig. 19a : carte des substrats sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux	32
Fig. 19b : carte des Vitesses de courant sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux	33
Fig. 19c : carte des couples substrats/vitesse de courant sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux	34
Fig. 19d : carte des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux	35
Fig. 20 Carte de localisation des sites de Loire dont les habitats macro-benthiques sont caractérisés	37
Fig. 21 : Répartition des différents types de substrat du lit (à gauche) et des berges (à droite) des différents sites	39
Figure 22 : Recouvrement de différents types de substrats dans les bras morts de quatre sites (T1, T3, T6 et site de Ingrandes) dans le chenal et sur les berges.	40
Fig. 23 : Analyse des scores des principaux facteurs décrivant les peuplements sur différents sites de Loire.	42
Fig. 24 : analyse des scores « variété » par groupes taxinomiques (lit vif et bras mort). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	44
Fig. 25 : analyse des scores « abondance » par groupes taxinomiques (lit vif et bras mort). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	44
Fig. 26 : Analyse des scores des principaux facteurs décrivant les peuplements sur le chenal principal de différents sites de Loire. (Valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	46
Fig. 27 : analyse des scores « variété » par groupes taxinomiques (lit vif seul). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	47
Fig. 28 : analyse des scores « abondance » par groupes taxinomiques (lit vif seul). (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	47
Figure 29a : carte des substrats sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux	51
Figure 29b : carte des Vitesses de courant sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux	52
Figure 29c : carte des couples substrats/vitesse de courant sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux	53
Figure 29d : carte des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat après travaux	55
Fig. 30 : Analyse comparative des scores des différents sites de Loire et du site de Ingrandes avant et après travaux : analyse chenal principal et bras mort (valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	58
Figure 31 : Analyse comparative des scores des différents sites de Loire et du site de Ingrandes avant et après travaux : analyse chenal principal et bras mort. (Valeur pondérée par rapport à la valeur max sur l'ensemble des stations)	59
Fig. 32 : Evolution des scores d'abondance, de diversité, de richesse et d'équitabilité sur les sites et évolution de l'abondance des Unionidés entre le Bec de Vienne et les Ponts de Cé.	61
Fig. A1a : Carte des substrats sur le site 1	70
Fig. A1b : Carte des champs de vitesse sur le site 1	70
Fig. A1c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 1	71
Fig. A1d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 1	71
Fig. A2a : Carte des substrats sur le site 2	72
Fig. A2b : Carte des champs de vitesse sur le site 2	72
Fig. A2c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 2	73
Fig. A2d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 2	73
Fig. A3a : Carte des substrats sur le site 3	74
Fig. A3b : Carte des champs de vitesse sur le site 3	74
Fig. A3c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 3	75
Fig. A3d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 3	75
Fig. A4a : Carte des substrats sur le site 4	76
Fig. A4b : Carte des champs de vitesse sur le site 4	76
Fig. A4c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 4	77
Fig. A4d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 4	77
Fig. A5a : Carte des substrats sur le site 5	78
Fig. A5b : Carte des champs de vitesse sur le site 5	78
Fig. A5c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 5	79

Fig. A5d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 5	79
Fig. A6a : Carte des substrats sur le site 6	80
Fig. A6b : Carte des champs de vitesse sur le site 6	80
Fig. A6c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 6	81
Fig. A6d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 6	81

Liste des tableaux

Tableau I : Les différents types de substrats : principales caractéristiques	9
Tableau II : Principales caractéristiques des sites de Loire analysés	10
Tableau III : Principales caractéristiques du cortège faunistique recensé sur les sites de La-Charité-sur-Loire et Bréhémont en 1996.	10
Tableau IV : Analyse conjointe des sites de la Charité sur Loire et Bréhémont. Nombre de taxons et nombre de taxons spécifiques par type de milieu.	12
Tableau V : Diversité de Shannon et équitabilité moyenne par prélèvement, relevées sur les sites de Bréhémont et de La-Charité-sur-Loire au cours de l'année 1996.	13
Tableau VI : Analyse conjointe des sites de la Charité sur Loire et Bréhémont. Nombre de taxons et nombre de taxons spécifiques par type de substrat.	15
Tableau VII : principales caractéristiques du site de Ingrandes	30
Tableau VIIIa : recouvrement de différents types de substrats sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux.	32
Tableau VIIIb : recouvrement de différents types des vitesses de courant sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux	33
Tableau VIIIc1 : recouvrement de différents habitats (couples substrat-vitesse dans le chenal principal du site d'Ingrandes. Etat avant travaux	34
Tableau VIIIc2 : recouvrement de différents substrats dans le bras de Cul-de-Bœuf sur le site d'Ingrandes. Etat avant travaux.	35
Tableau VIIId : recouvrement des substrats des berges et des épis sur le site d'Ingrandes : Etat avant travaux.	36
Tableau VIIIe : surface représentée par les ouvrages anthropiques sur le site de Ingrandes	36
Tableau IX : principales caractéristiques géomorphologiques des sites de Loire étudiés	38
Tableau X : Analyse comparée des scores des différentes stations ligériennes (en % par rapport à la valeur maximale enregistrée sur tous les sites analysés)	41
Tableau XIa : recouvrement de différents types de substrat sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux.	51
Tableau XIb : recouvrement de différents types des vitesses de courant sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux	52
Tableau XIc1 : recouvrement de différents habitats (couples substrat-vitesse dans le chenal principal du site d'Ingrandes. Etat après travaux	53
Tableau XIc2 : recouvrement de différents substrats dans le bras de Cul-de-Bœuf sur le site d'Ingrandes. Etat après travaux.	54
Tableau XII : Résultats des différents scénarii de modélisation sur le site de Ingrandes. Analyse des variables de description des peuplements.	55
Tableau XIII : Résultats des différents scénarii de modélisation sur le site de Ingrandes. Analyse des scores variété et abondance des différents groupes taxinomiques.	56

Les annexes

Annexe I : Tableau de données du site de Ingrandes

Annexe II : Carte des habitats macrobenthiques
de quelques sites de Loire



Annexe I : Tableau de données du site d'Ingrandes

	Indices globaux							Variété par groupes taxinomiques							Abondance par groupes taxinomiques									
	Abondance	Richesse taxinomique	Richesse pondérée macro-habitats/micro-habitats(/ au % du nb total de taxons)	Richesse pondérée macro-habitats/micro-habitats(/ au % du nb spécifique de taxons)	Diversité de Margalef	Diversité de Shannon	Equitabilité	Ephéméroptères	Plécoptères	Trichoptères	Odonates	Coléoptères	EPT	Tout	tout-ept	Ephéméroptères	plécoptères	Trichoptères	Odonates	Coléoptères	Ephémères Plécoptères et Trichoptères	Tout	Trout-Ephémères Plécoptères et Trichoptères	
T1	Lit vif	152838	873	368	12	85	90	31	219	27	103	0	15	327	873	545	2094	56	2082	2	26	4171	143026	140088
	Bras mort	521	11	390	20	1	1	0	2	0	1	1	1	3	11	8	23	0	3	2	3	27	699	672
	Score total	153360	883	758	32	86	91	31	221	27	104	1	16	329	883	553	2118	56	2085	4	29	4198	143725	140760
T2	Lit vif	174428	1018	436	18	98	103	35	256	31	121	1	20	383	1018	634	2629	65	2611	3	37	5236	162572	158756
	Bras mort	0	0	462	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Score total	174428	1018	898	48	98	103	35	256	31	121	1	20	383	1018	634	2629	65	2611	3	37	5236	162572	158756
T3	Lit vif	130026	779	332	13	72	76	25	201	22	95	0	14	301	779	477	2110	47	1970	3	27	4076	120560	117555
	Bras mort	810	14	351	21	2	2	1	3	0	1	1	1	3	14	11	41	0	4	2	3	45	920	875
	Score total	130836	793	683	33	74	78	25	204	22	96	1	15	304	793	488	2151	47	1974	4	29	4121	121480	118430
T4	Lit vif	181730	1101	462	14	105	112	37	281	46	128	0	18	417	1101	682	2648	98	2539	3	32	5179	167415	164389
	Bras mort	0	0	490	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Score total	181730	1101	952	36	105	112	37	281	46	128	0	18	417	1101	682	2648	98	2539	3	32	5179	167415	164389
T5	Lit vif	138343	871	365	11	92	99	34	219	41	97	0	13	324	871	546	1674	88	1652	2	22	3326	127188	125863
	Bras mort	0	0	387	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Score total	138343	871	752	30	92	99	34	219	41	97	0	13	324	871	546	1674	88	1652	2	22	3326	127188	125863
T6	Lit vif	163000	978	411	13	95	101	34	251	33	116	0	16	373	978	604	2349	69	2343	2	29	4689	151149	147999
	Bras mort	265	4	435	21	1	1	0	1	0	0	0	0	1	4	3	12	0	1	0	1	13	278	264
	Score total	163264	982	847	33	96	101	34	251	33	116	0	17	374	982	608	2362	69	2344	3	30	4702	151426	148263
Ingrandes	Lit vif	237123	1277	532	14	141	150	54	305	46	141	0	18	457	1277	819	1090	95	1059	0	12	2145	173055	172911
	Bras mort	4531	79	563	23	12	13	4	16	0	4	2	5	20	79	59	179	0	19	4	10	199	4744	4545
	Score total	241654	1356	1095	37	153	163	58	321	46	145	2	22	476	1356	878	1269	95	1078	4	22	2344	177798	177456

Annexe II :

Site 1

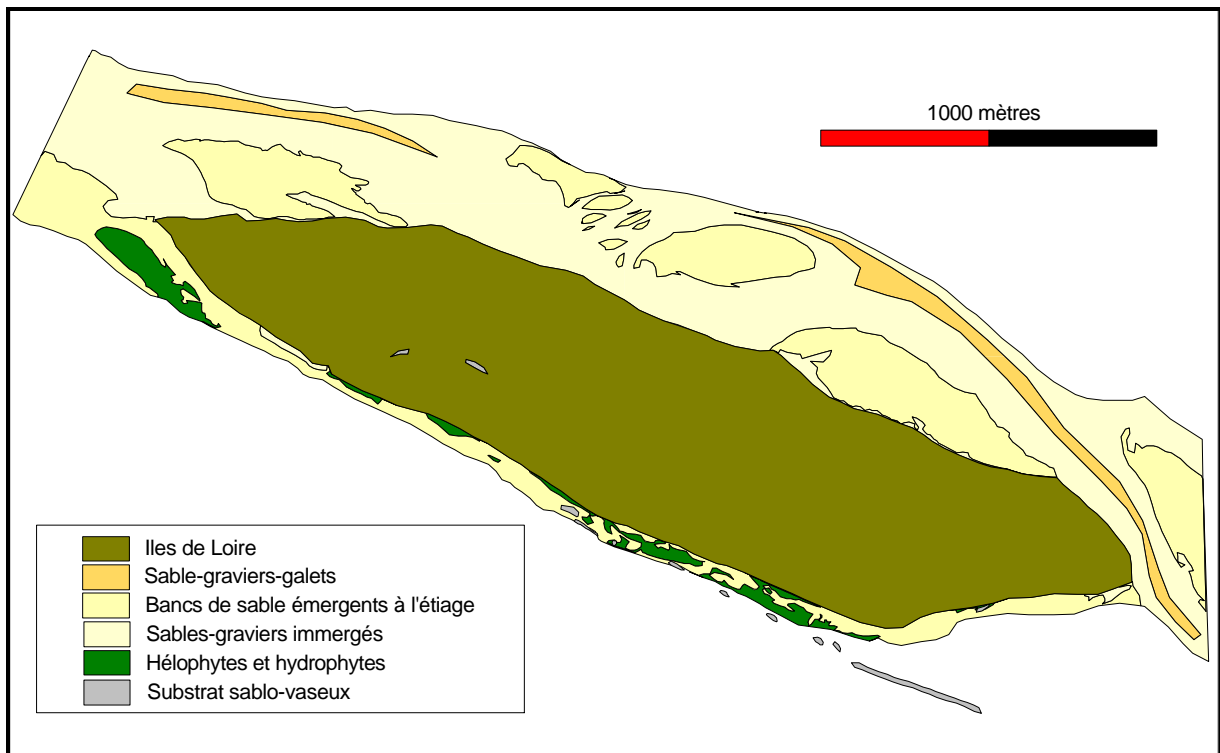


Fig. A1a : Carte des substrats sur le site 1

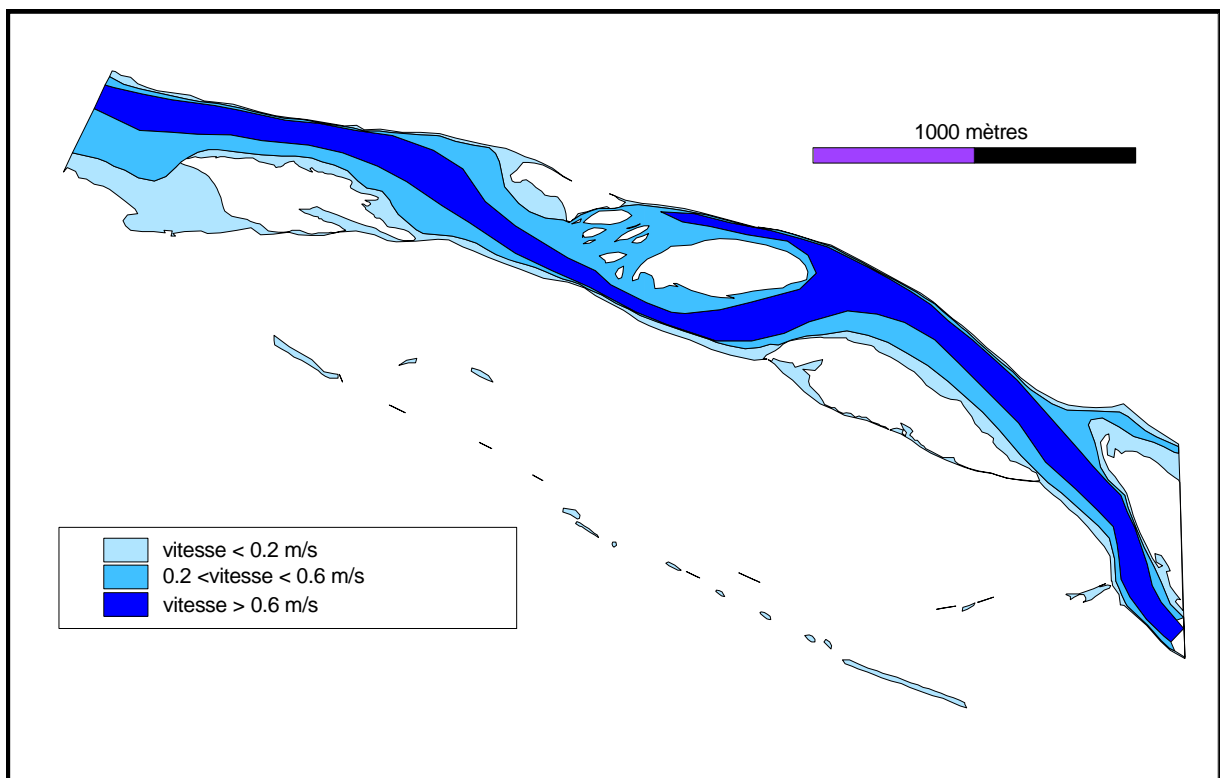


Fig. A1b : Carte des champs de vitesse sur le site 1

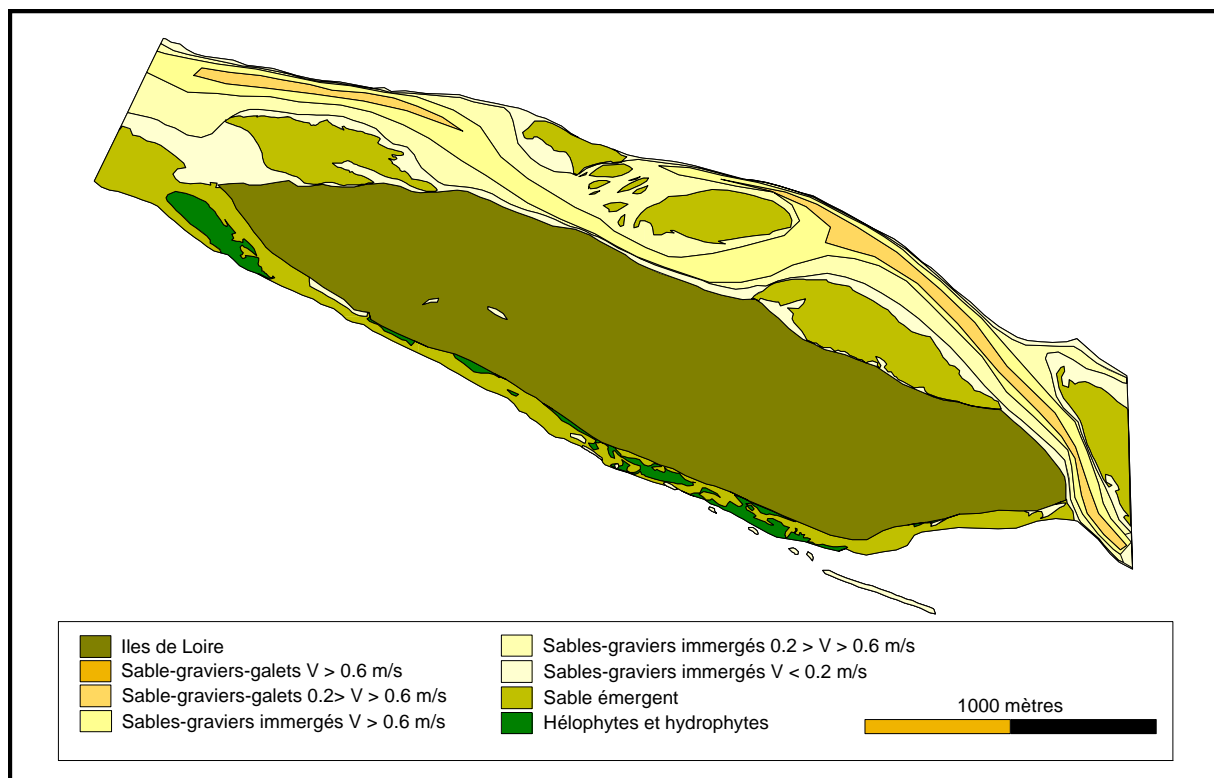


Fig. A1c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 1

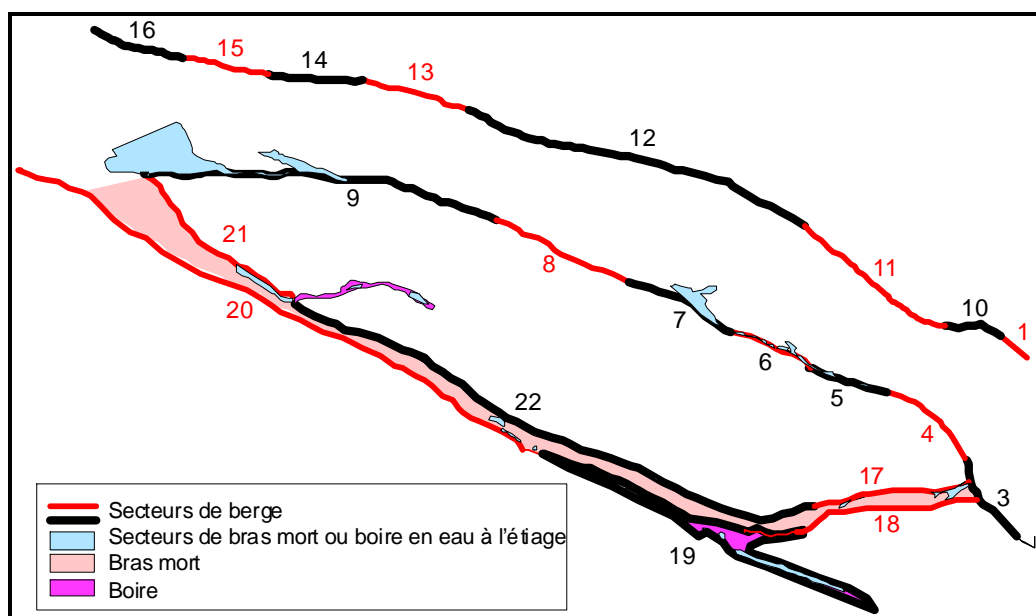


Fig. A1d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 1

Site 2

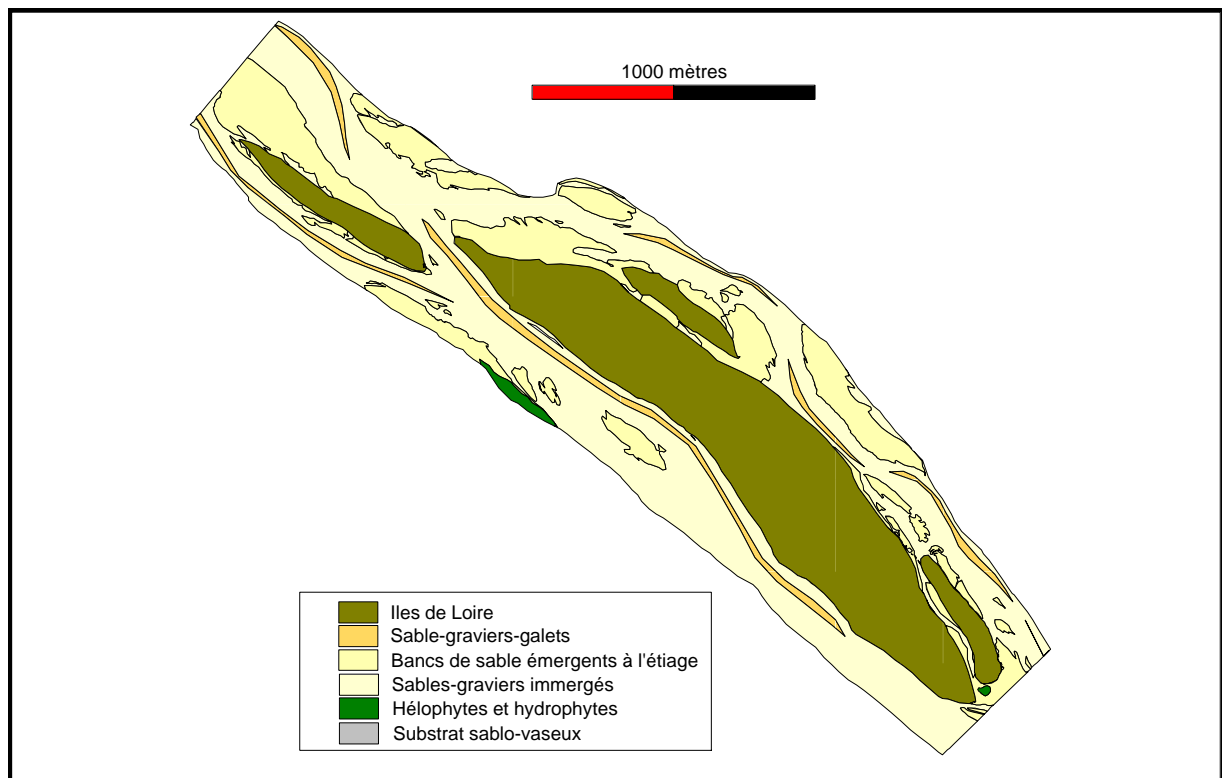


Fig. A2a : Carte des substrats sur le site 2

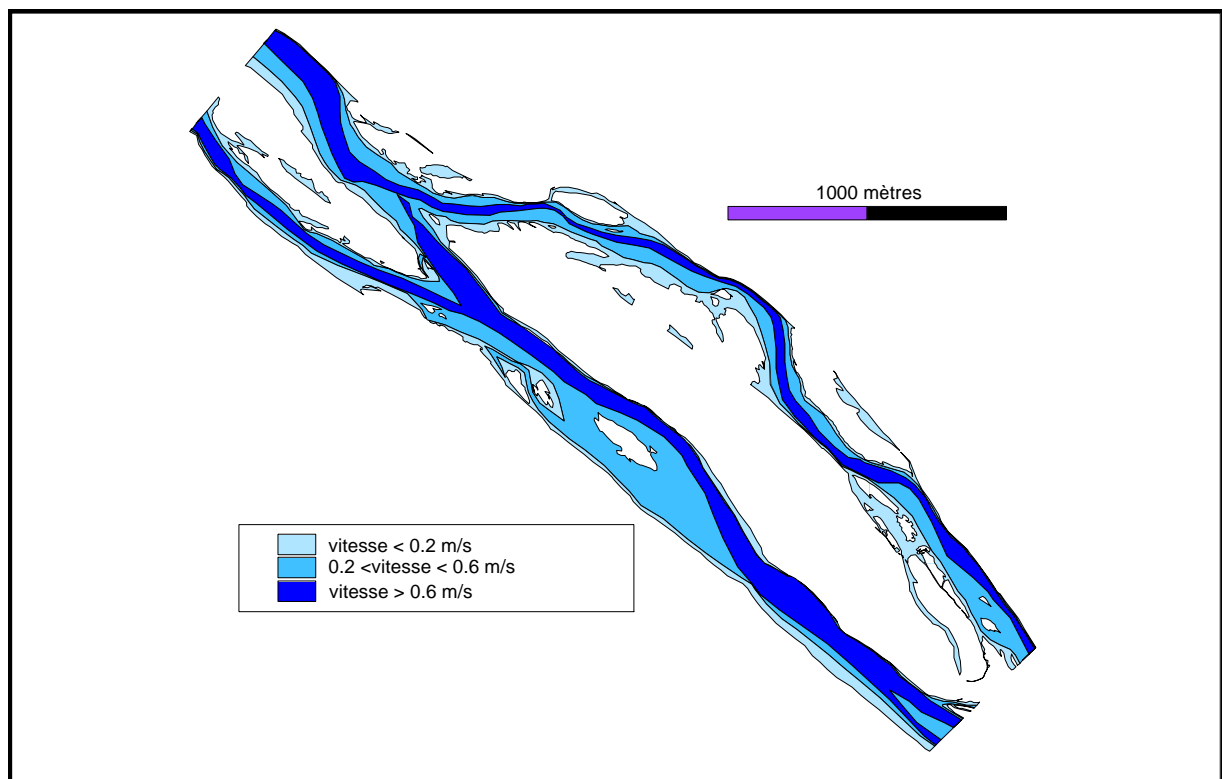


Fig. A2b : Carte des champs de vitesse sur le site 2

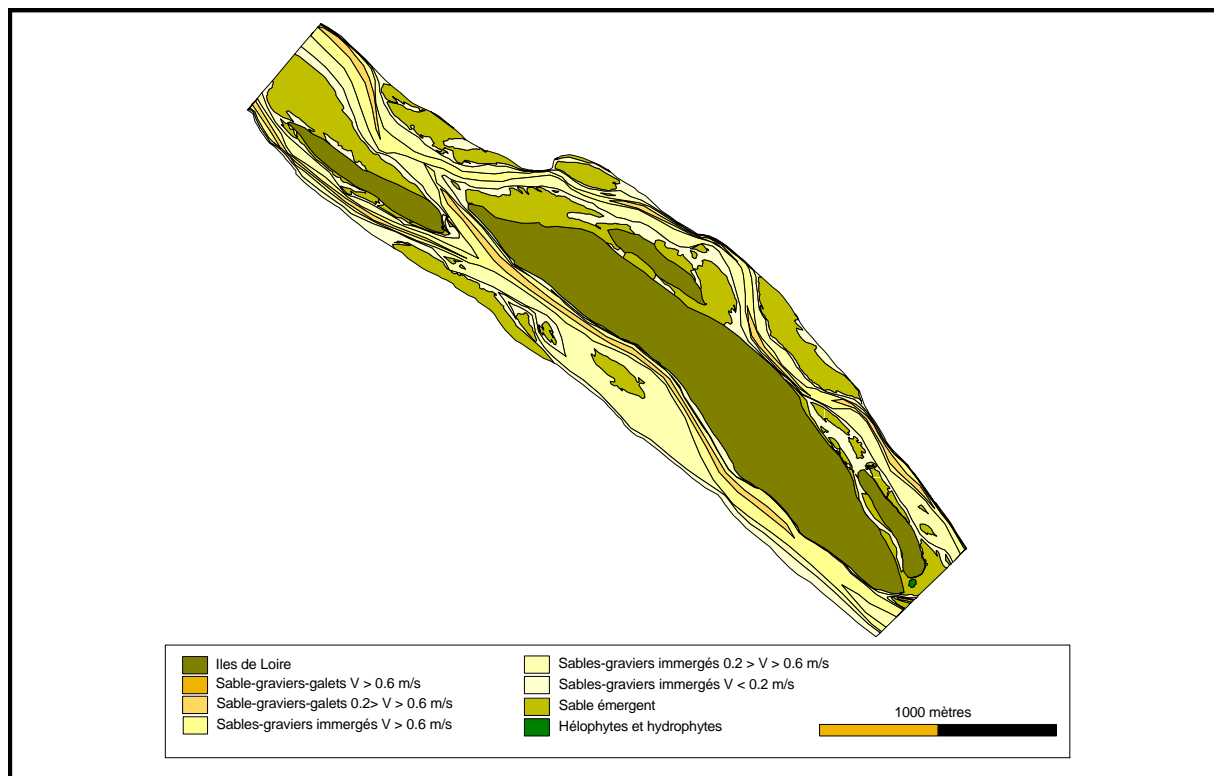


Fig. A2c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 2

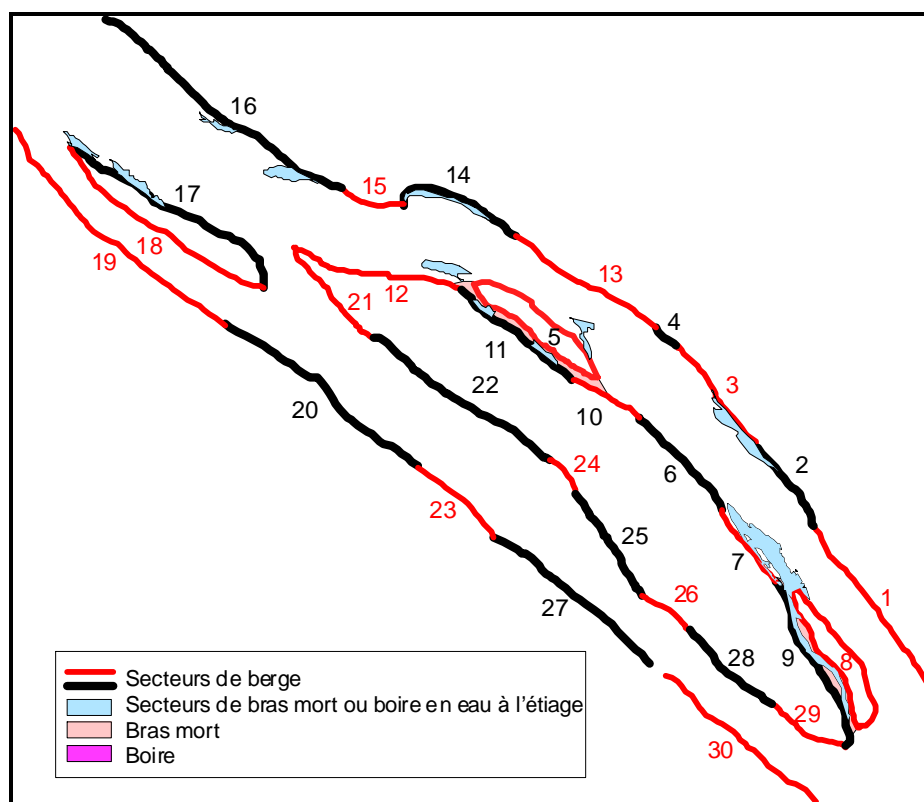


Fig. A2d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 2

Site 3

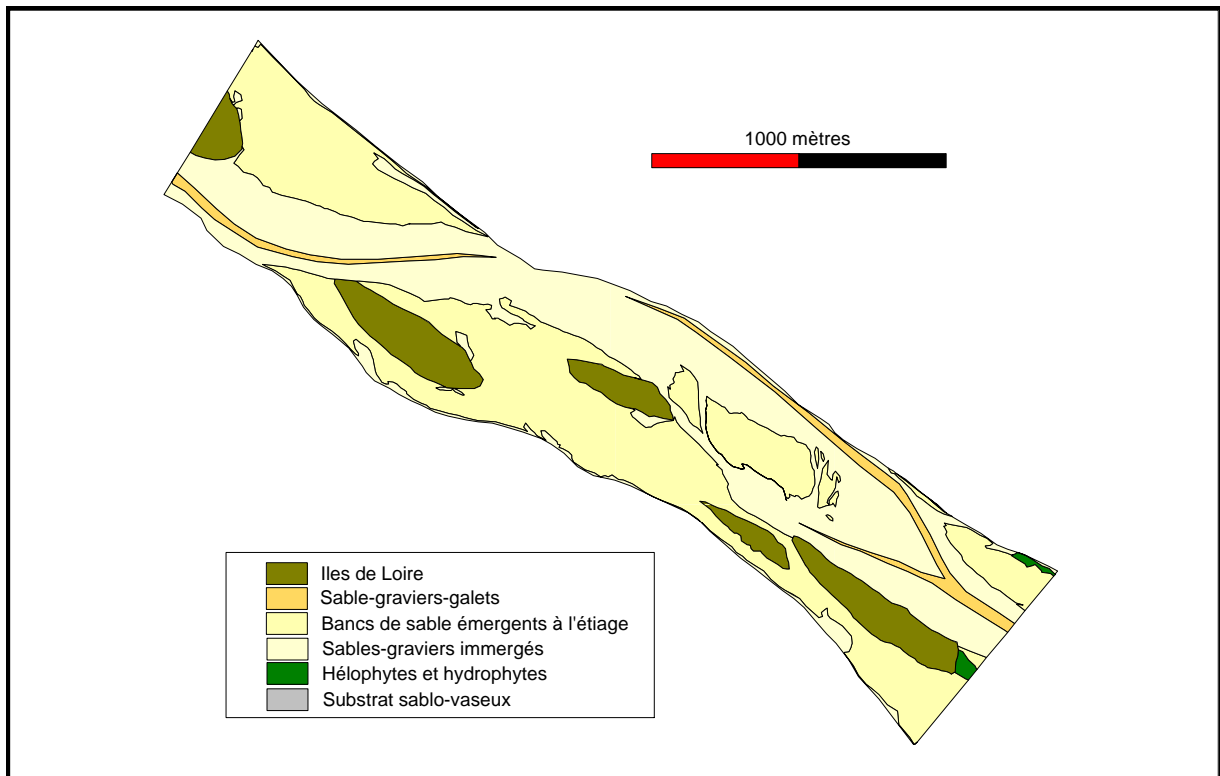


Fig. A3a : Carte des substrats sur le site 3

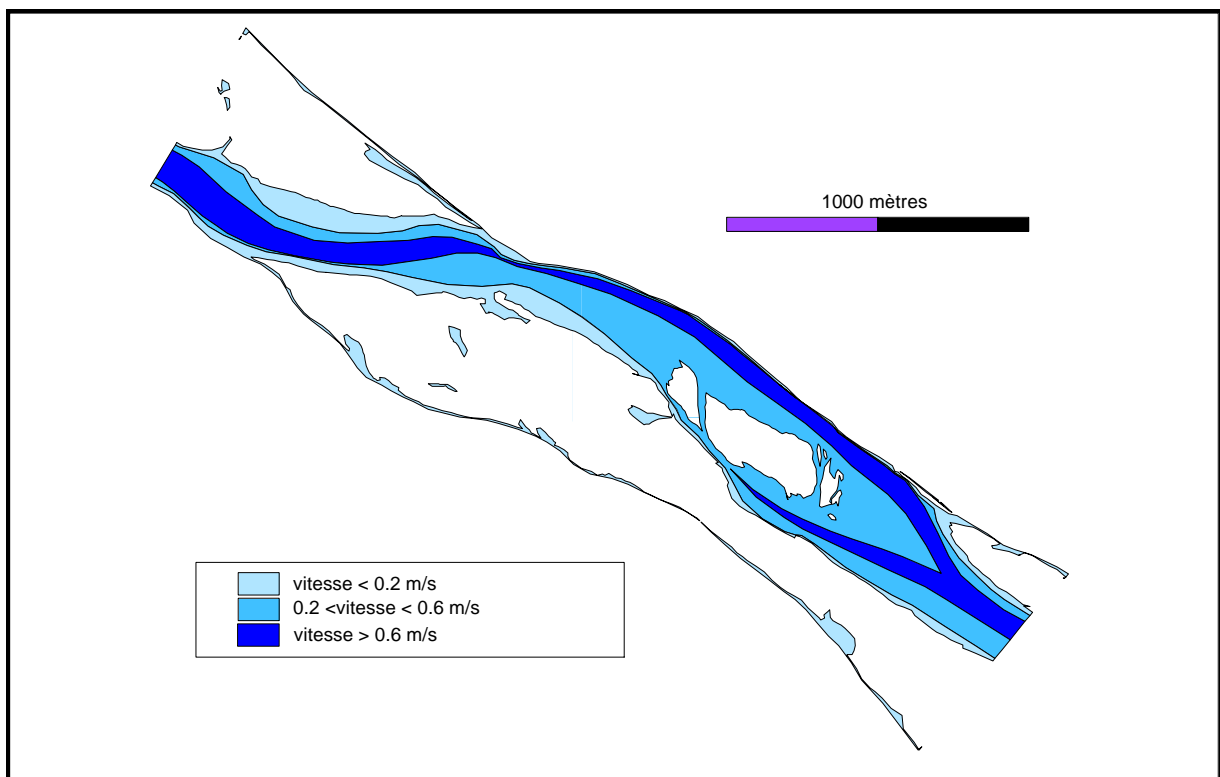


Fig. A3b : Carte des champs de vitesse sur le site 3

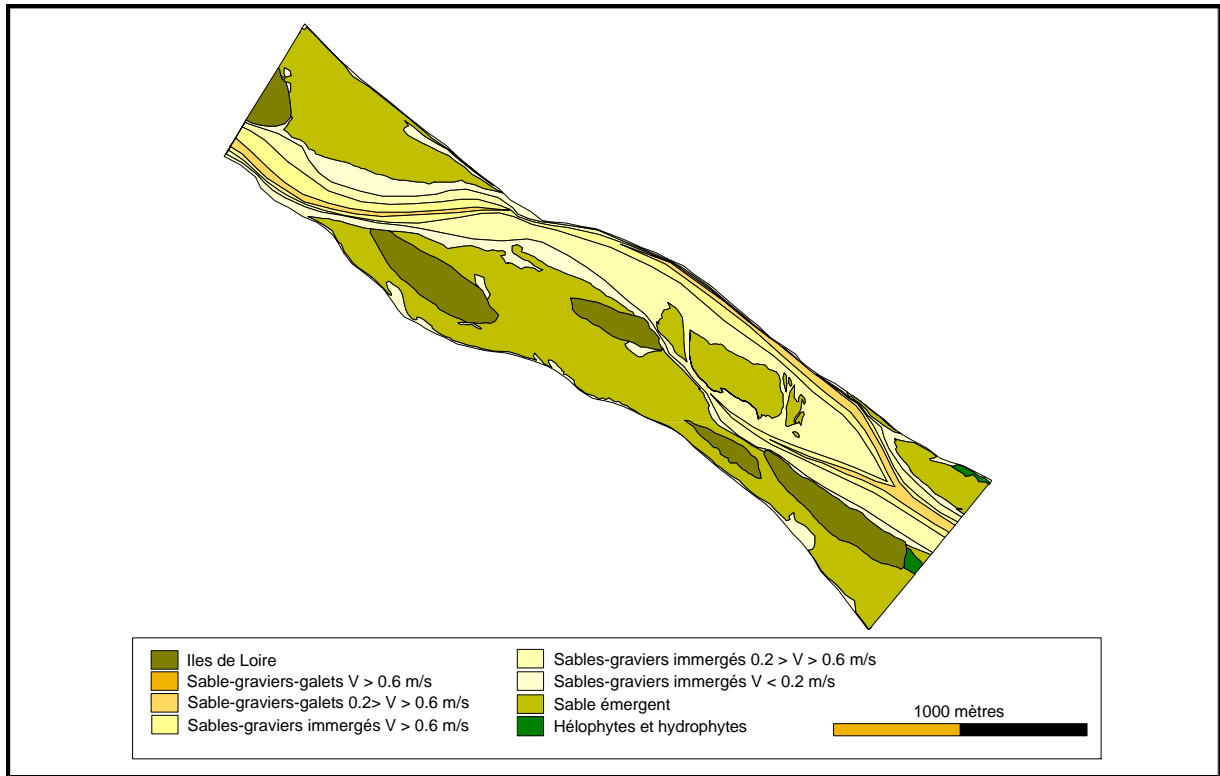


Fig. A3c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 3

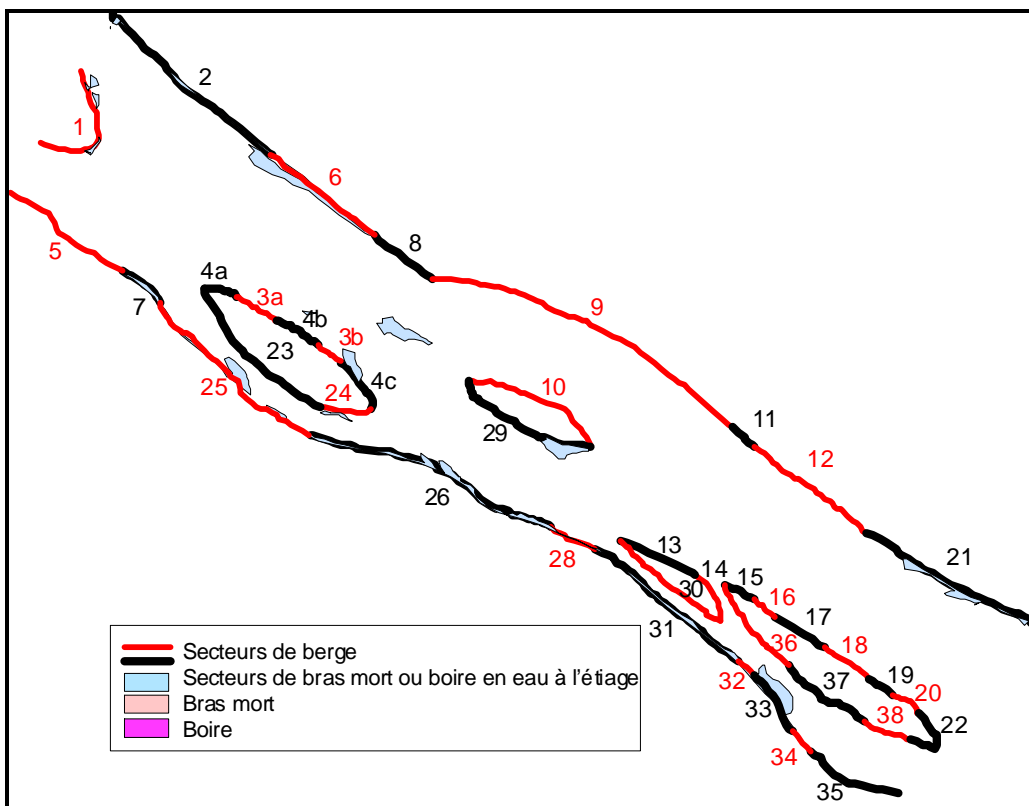


Fig. A3d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 3

Site 4

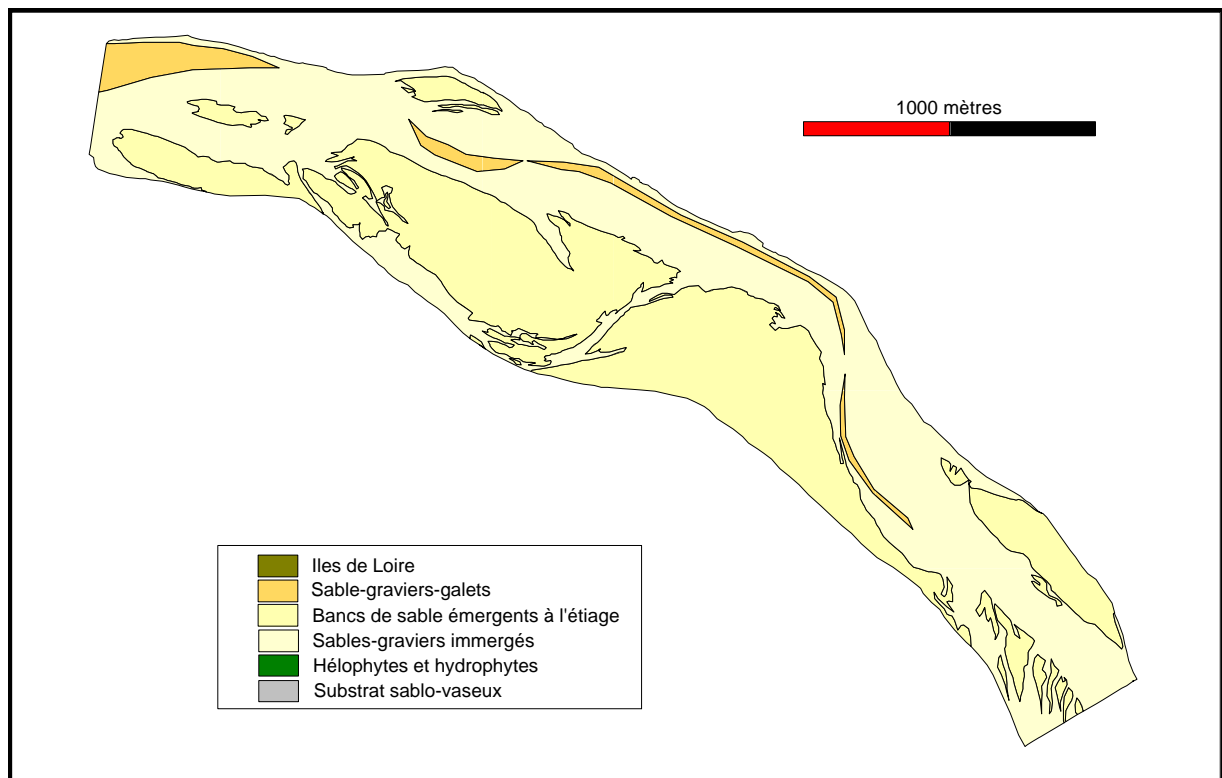


Fig. A4a : Carte des substrats sur le site 4

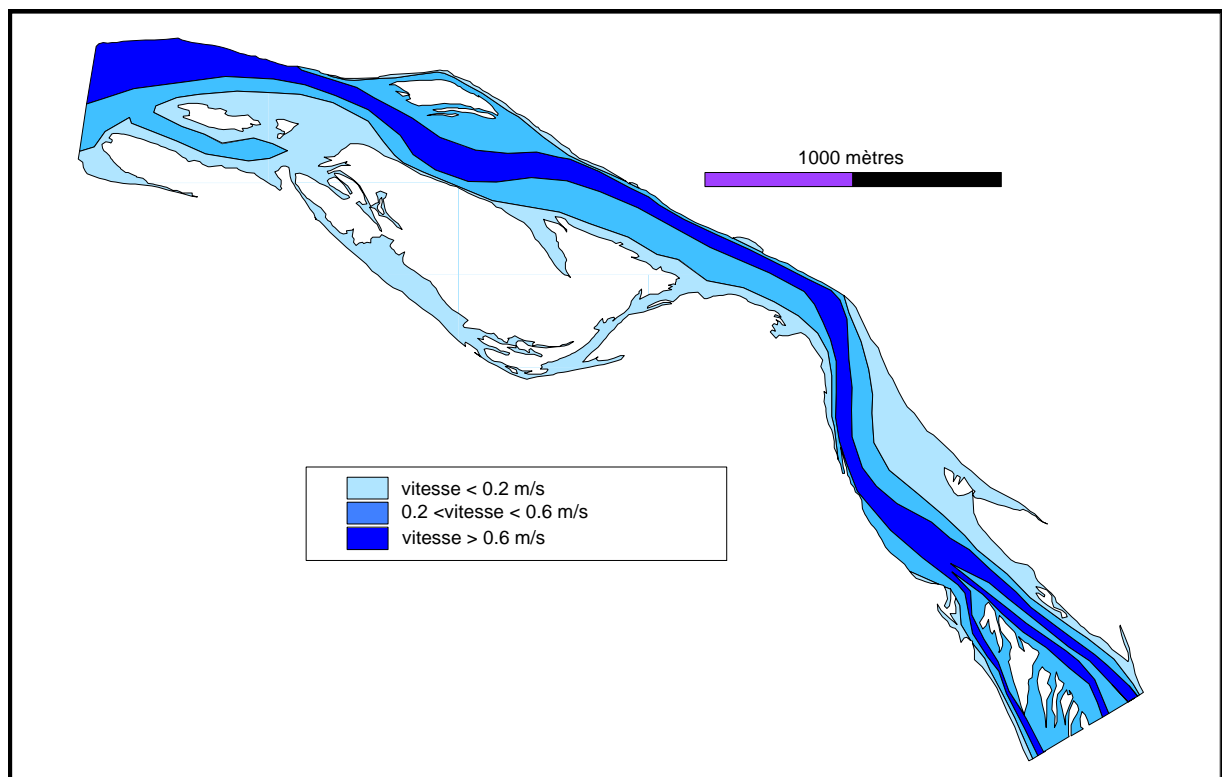


Fig. A4b : Carte des champs de vitesse sur le site 4

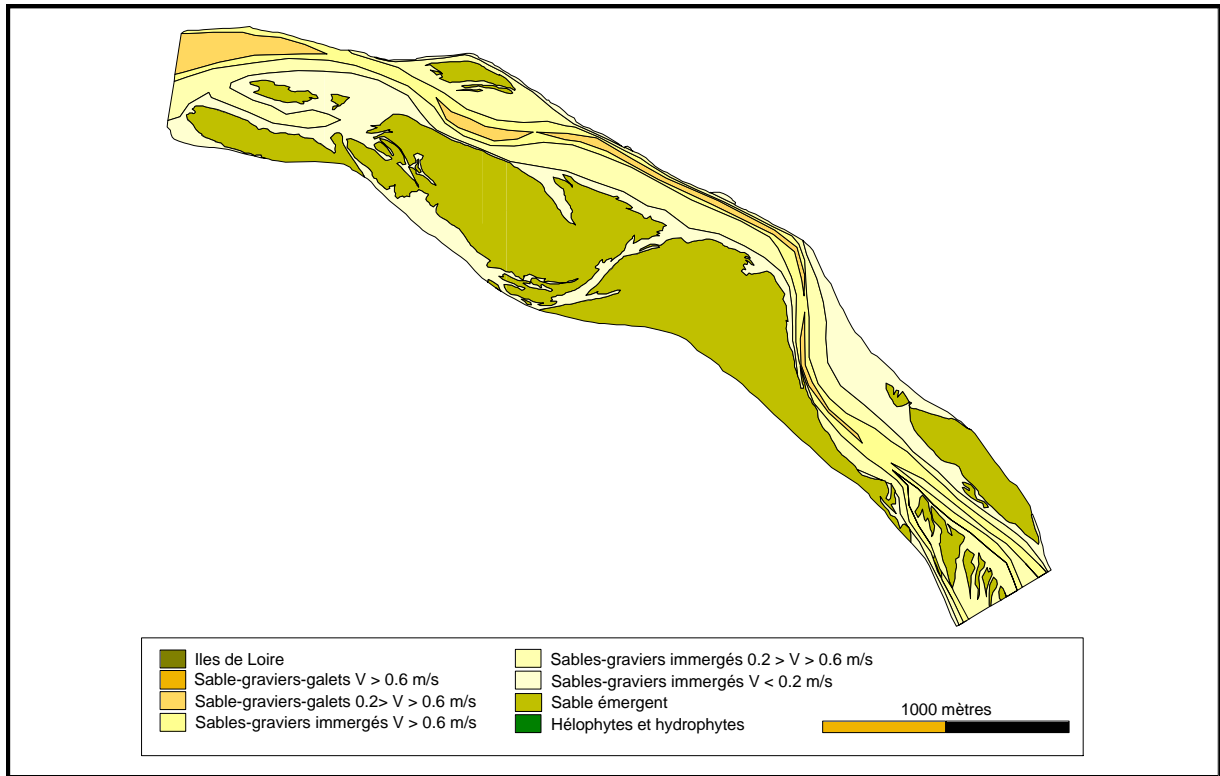


Fig. A4c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 4

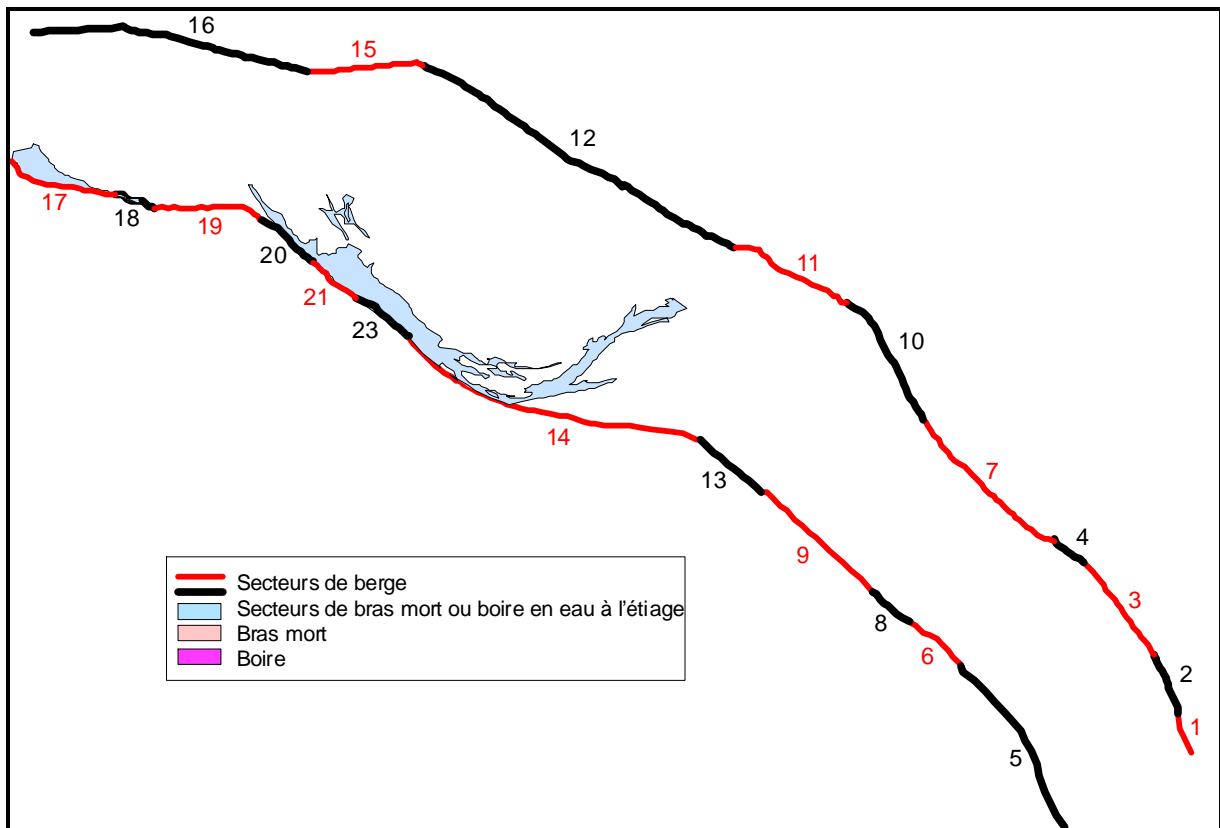


Fig. A4d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 4

Site 5

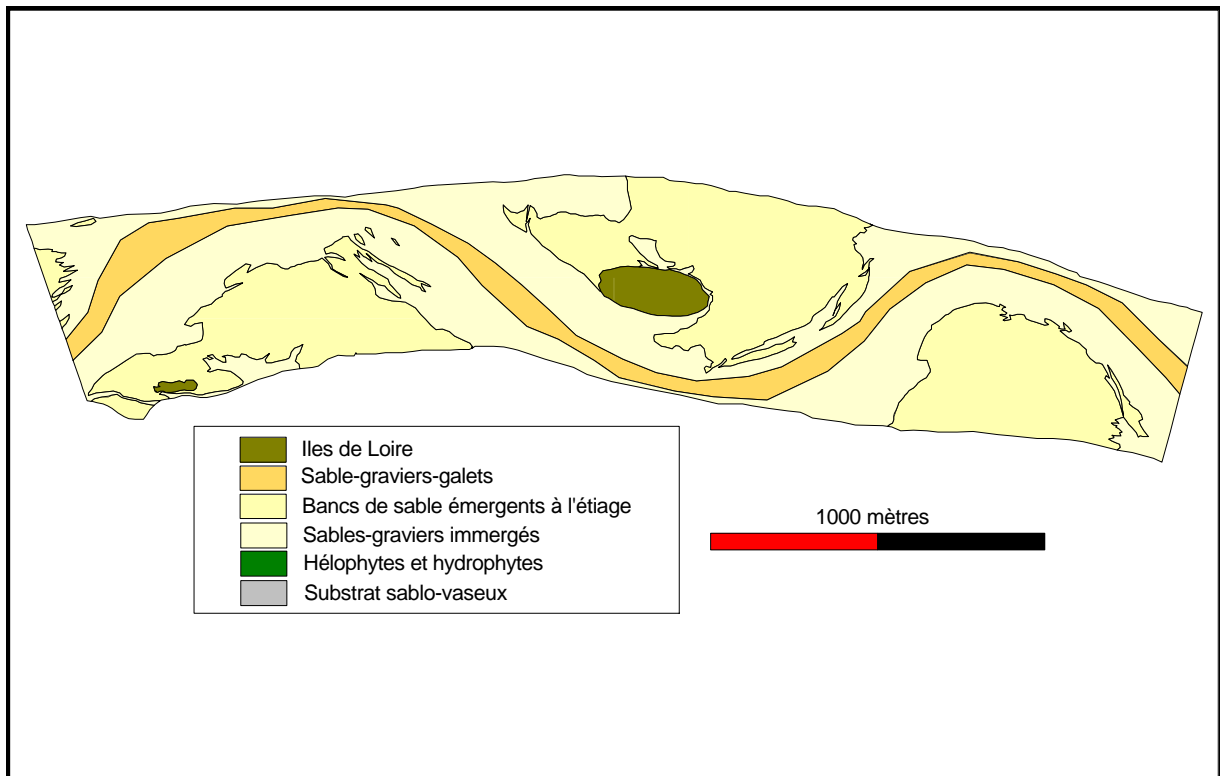


Fig. A5a : Carte des substrats sur le site 5

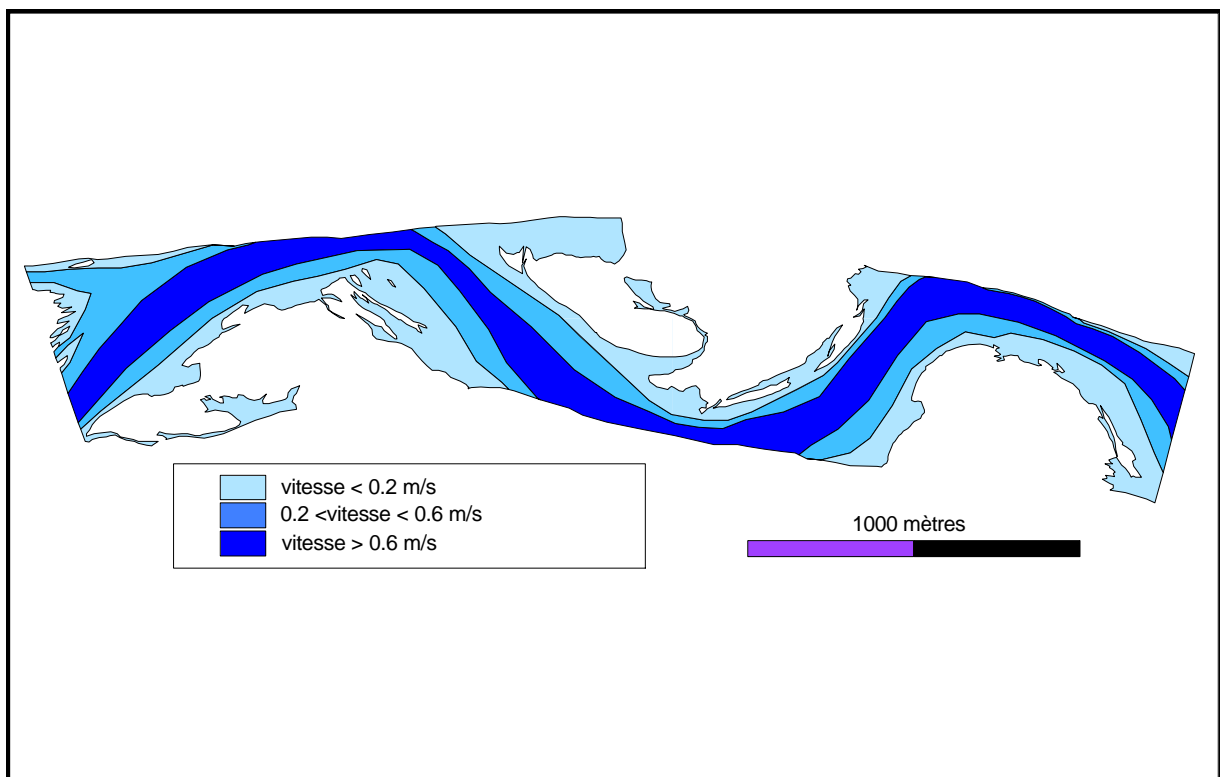


Fig. A5b : Carte des champs de vitesse sur le site 5

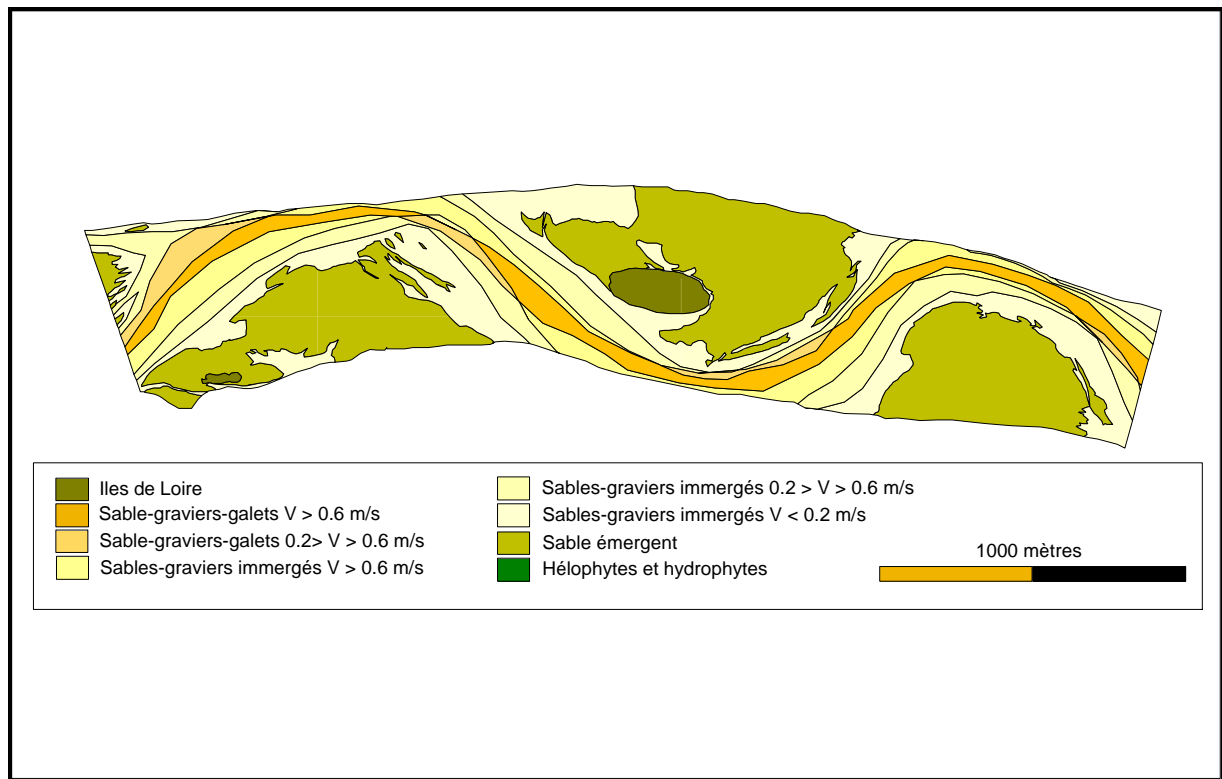


Fig. A5c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 5

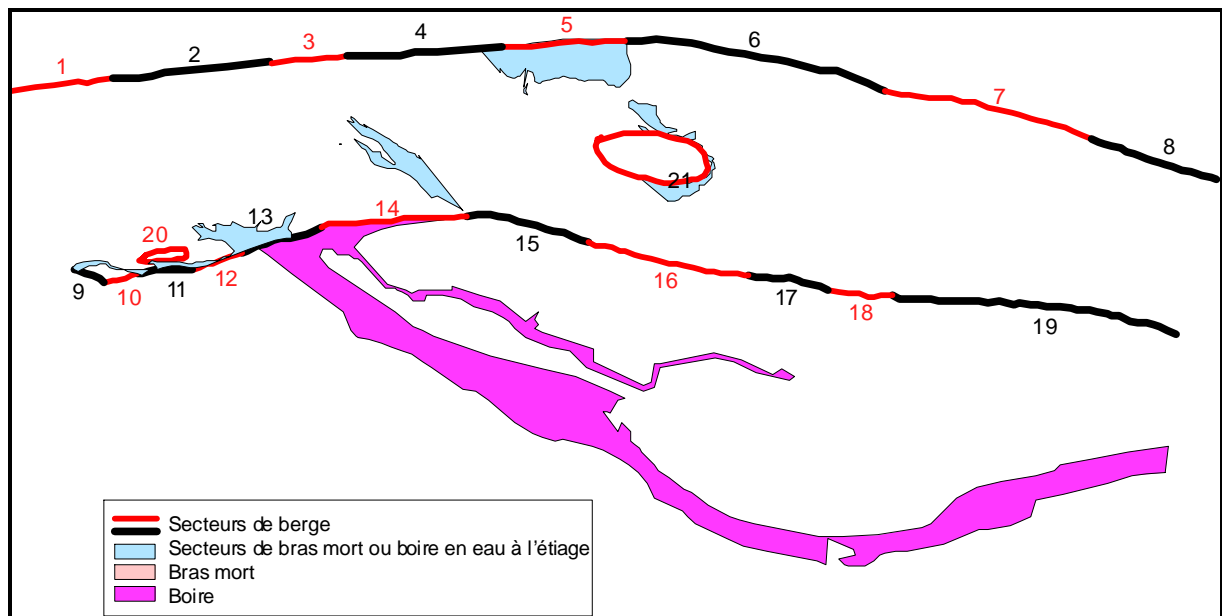


Fig. A5d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 5

Site 6

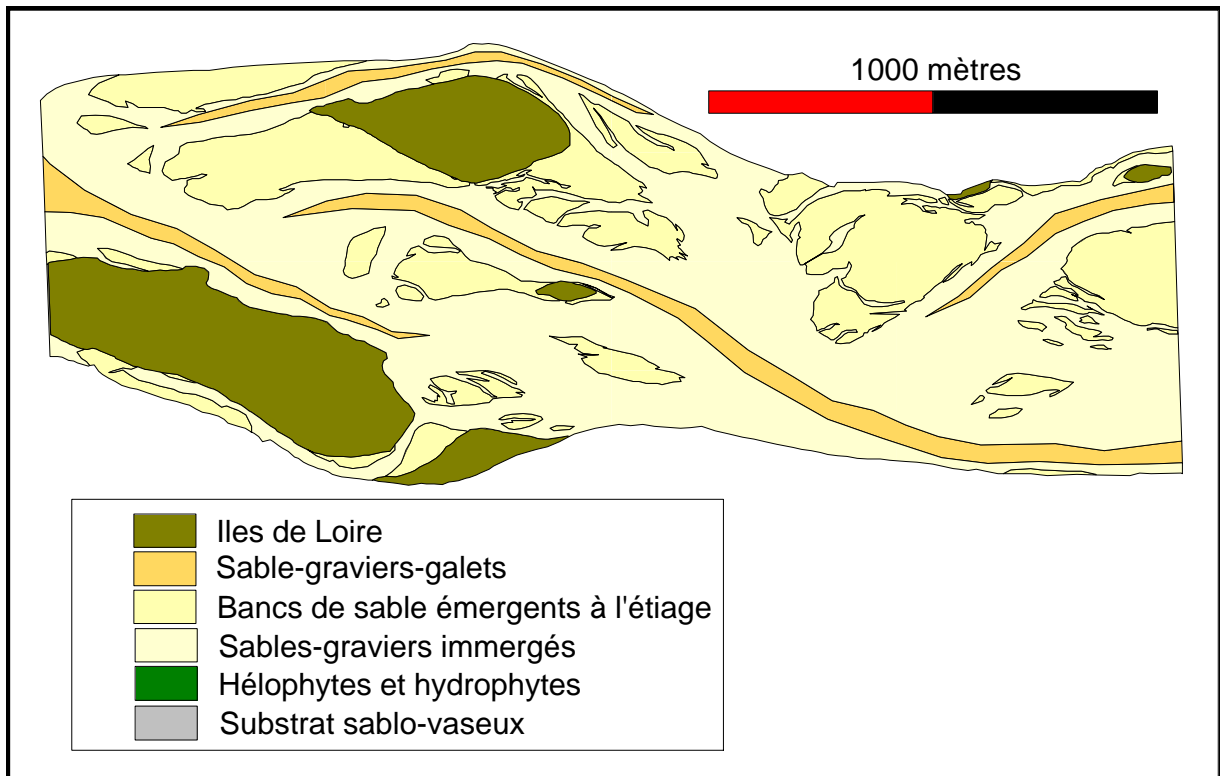


Fig. A6a : Carte des substrats sur le site 6

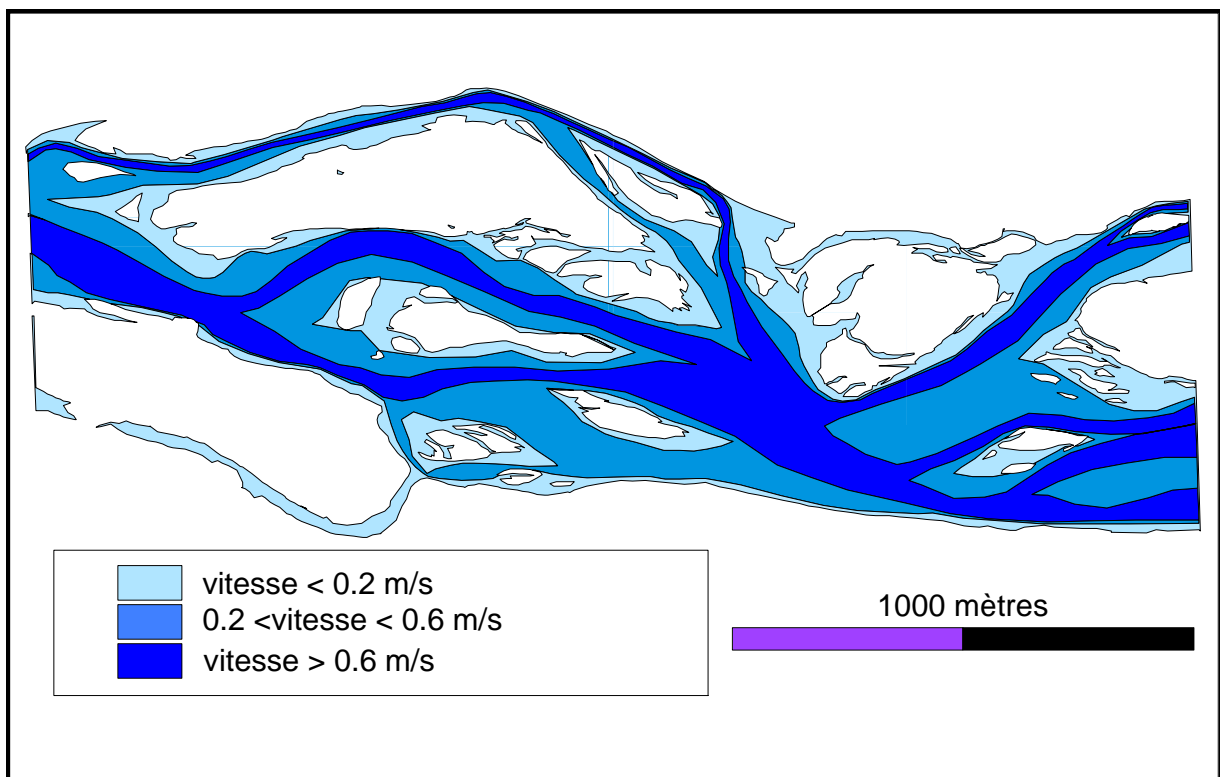


Fig. A6b : Carte des champs de vitesse sur le site 6

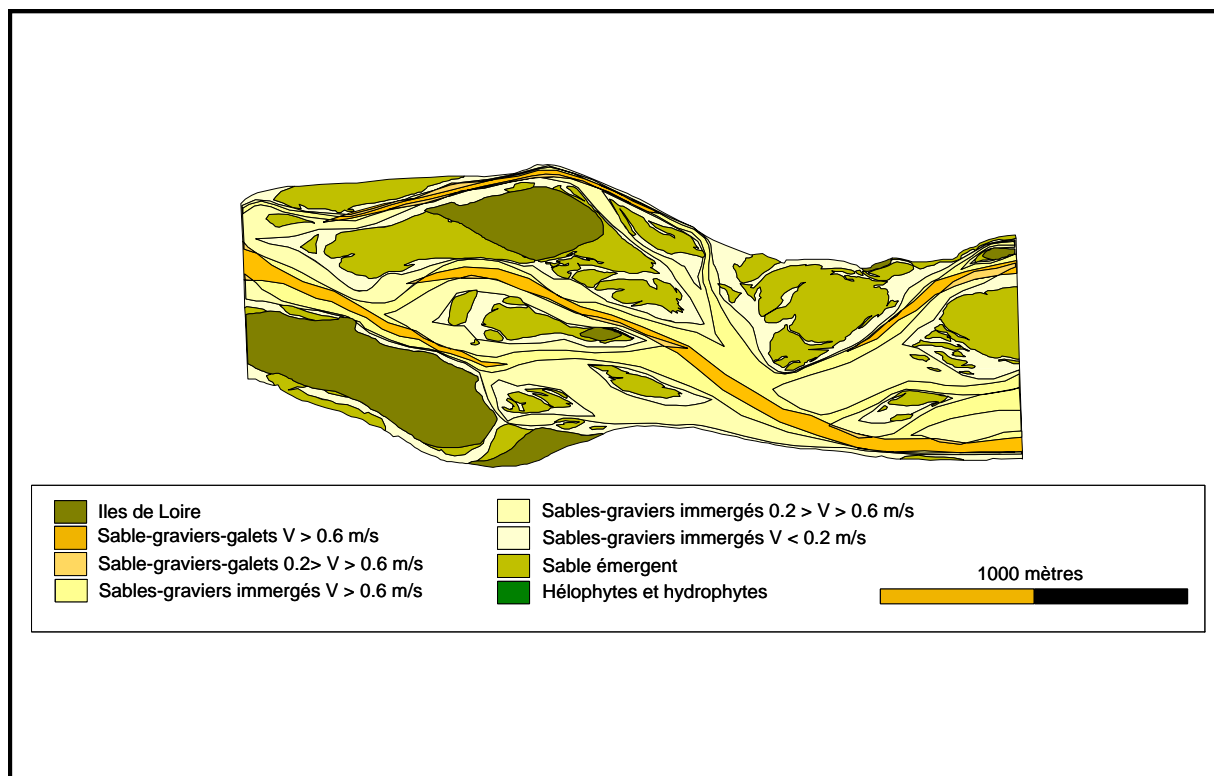


Fig. A6c : Carte des couples substrat/vitesse sur le site 6

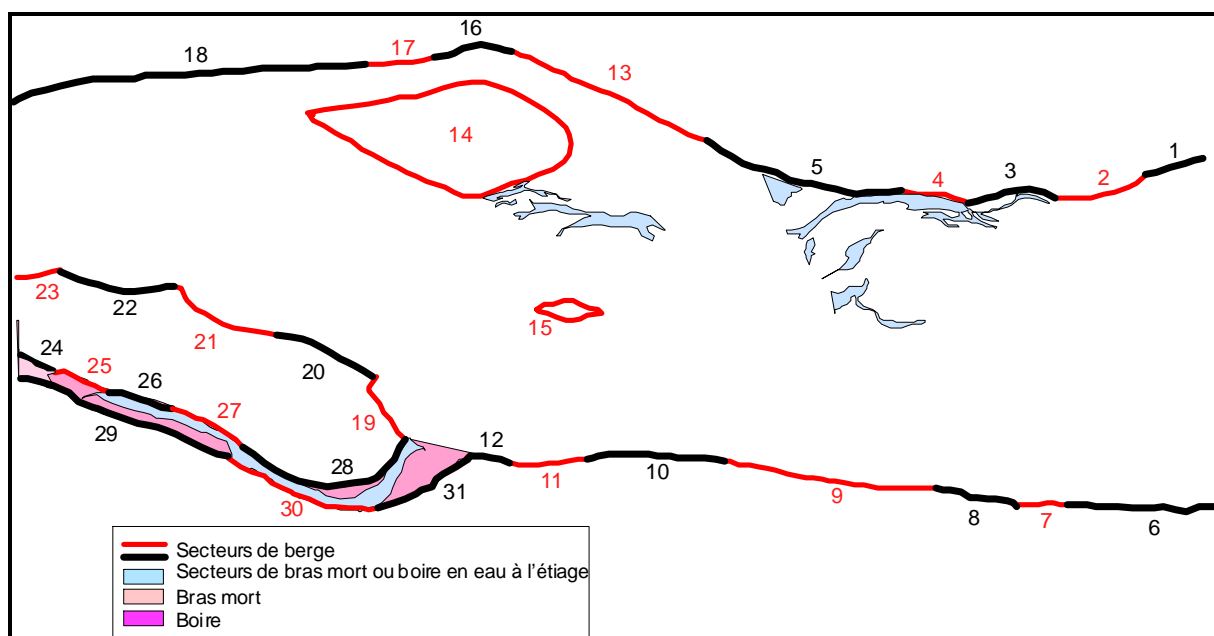


Fig. A6d : Carte de localisation des secteurs de berge homogènes sur le site 6