



Évaluation des effets écologiques d'une restauration physique sur le Vistre - secteur de Bouillargues.

Virginie Archaimbault, Christian Chauvin, B. Dumont, Alain Dutartre, Bernard Montuelle, E. Trichet, Soizic Morin

► To cite this version:

Virginie Archaimbault, Christian Chauvin, B. Dumont, Alain Dutartre, Bernard Montuelle, et al..
Évaluation des effets écologiques d'une restauration physique sur le Vistre - secteur de Bouillargues..
[Rapport de recherche] Irstea. 2011, pp.86. hal-02596800

HAL Id: hal-02596800

<https://hal.inrae.fr/hal-02596800>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



« Évaluation des effets écologiques d'une restauration physique sur le Vistre – secteur de Bouillargues »

Rapport de fin d'étude

Programme Agence de l'Eau RM& C – Cemagref 2008-2010

Rédaction :

Archaimbault V.
Chauvin C.
Dumont B.
Dutartre A.
Montuelle B. (coordination)
Trichet E.
Morin S.

Sommaire

I - Rappel	1
I - 1. Contexte	1
I - 2. Objectifs.....	2
II - Matériels et méthodes	2
II - 1. Caractérisation du site.....	2
II - 2. Bilan hydromorphologique.....	3
II - 2.1. Descriptif physique	3
II - 2.2. Régime thermique printanier et estival	6
II - 3. Mesures chimiques	8
II - 3.1. Échantillonnage	8
II - 3.2. Paramètres et protocoles analytiques	8
II - 3.3. Traitement des données	9
II - 4. Macrophytes	10
II - 4.1. Relevé général le long du profil longitudinal.....	10
II - 4.2. Étude détaillée	12
II - 5. Invertébrés	12
II - 5.1. Prélèvement des organismes	13
II - 5.2. Traitement des échantillons au laboratoire	14
II - 5.3. Traitement des données	14
II - 5.3.1 Approche Taxonomique	14
II - 5.3.2 Approche Fonctionnelle	15
II - 6. Processus biochimiques microbiens	18
II - 6.1. Échantillonnage	18
II - 6.2. Paramètres et protocoles analytiques	18
II - 7. Diatomées	19
II - 7.1. Echantillonnage	19
II - 7.2. Traitement des échantillons au laboratoire	20
III - Résultats intermédiaires / éléments de discussion	21
III - 1. Approche géomorphologique	21
III - 1.1. Faciès et classes de vitesse	21
III - 1.2. Régime thermique	24
III - 2. Caractérisation chimique.....	27
III - 2.1. Classes de qualité	27
III - 2.2. Variabilité spatio-temporelle	28
III - 3. Macrophytes	29
III - 3.1. Évolution des débits	29
III - 3.2. Facteurs environnementaux	30
III - 3.3. Analyse générale de la végétation aquatique	33
III - 4. Invertébrés	39
III - 4.1. Approche taxonomique.....	39
III - 4.2. Approche fonctionnelle	46
III - 5. Processus biochimiques microbiens	53
III - 5.1. Milieux sédimentaires	53
III - 5.2. Biofilms	56
III - 6. Diatomées : indice et diversité	61
III - 6.1. Approches « indicielles ».....	62

III - 6.2. Analyses taxonomiques et « traits » écologiques	63
III - 6.3. Impact de l'aménagement des sites sur la diversité spécifique.	65
IV - Éléments de conclusion par chapitre	66
IV - 1. Hydromorphologie	66
IV - 2. Chimie et processus microbiens	67
IV - 3. Macrophytes	67
IV - 4. Invertébrés	68
IV - 5. Diatomées	68
V - Éléments de synthèse	68

Table des tableaux

Tableau 1 - Variables utilisées dans la description des formes fluviales.	5
Tableau 2 - Codes d'habitabilité pour les supports benthiques en eau courante.....	6
Tableau 3 - Paramètres chimiques analysés sur le site de Bouillargues et méthodes employées	8
Tableau 4 - Définition et ordre d'échantillonnage des substrats.	13
Tableau 5 - Principales caractéristiques biologiques et écologiques des 6 groupes bio-écologiques définis par Usseglio-Polatera <i>et al.</i> (2001).....	17
Tableau 6 – Références des échantillons des diatomées collectées	20
Tableau 7 - Bilan quantitatif des types de faciès rencontrés dans les secteurs restauré et non-restauré.	21
Tableau 8 - Proportion des types de faciès rencontrés dans les secteurs restauré et non-restauré.	21
Tableau 9 - Classification granulométrique (Malavoi, Souchon, 1989)	31
Tableau 10 - Liste des taxons dominants et des codes correspondants.....	62

Table des figures

Figure 1 - Schéma général du secteur restauré de Bouillargues avec le descriptif des stations. En rose les zones non restaurées (servant de zone témoin) et en vert les zones restaurées.	3
Figure 2 - Principe de description des formes fluviales.	4
Figure 3 - Exemple de l'en-tête des feuilles de saisie des variables à renseigner pour la description hydromorphologique d'un tronçon de rivière.....	5
Figure 4 - Limites et numérotation des zones de relevé floristique	11
Figure 5 - Proportion des classes de vitesses moyennes présentes dans les deux types de secteurs pour un débit de 0,2 m ³ /s.	22
Figure 6 - Proportions des types granulométriques dominants dans chacun des secteurs.	23
Figure 7 - Proportions de la granulométrie dominante dans le faciès « plat » dans chacun des secteurs.	23
Figure 8 - Proportions de la granulométrie dominante dans le faciès « mouille » dans chacun des secteurs.....	24
Figure 9 - Valeurs maximales quotidiennes dans quatre stations du site de Bouillargues.....	25
Figure 10 - Débits moyens journaliers du Vistre à Bernis (source Banque Hydro).....	25
Figure 11 - Écarts journaliers aux quatre stations en phase printanière.....	26

Figure 12 - Positions et longueurs des différents faciès le long du secteur étudié (points rouges : position des enregistreurs de température. NB : l'enregistreur N°1, « Vistre_amont » est en amont du secteur décrit).....	27
Figure 13 - ACP du tableau des analyses chimiques (24 relevés x 7 paramètres) : a) histogramme des valeurs propres ; b) projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 ; c) projection des relevés avec regroupement des relevés par date de prélèvement. Bleu : prélèvements réalisés sur les stations 2, 5 et 9, situées en amont du rejet de la STEP ; Rouge : prélèvements réalisés sur la station 1, située en aval du rejet de la STEP.	28
Figure 14 - Débits journaliers moyens (m ³ /s) en 2008 mars (rose)-avril (bleu) (a), mai (b), juin (jaune)-juillet (rouge) (c) août (orange)-septembre (marron) (d).....	30
Figure 15 - Caractérisation des types de substrats par site.....	31
Figure 16 - Caractérisation des zones par classe de substrat.....	32
Figure 17 - Évolution de la vitesse le long du tronçon (cm/s)	32
Figure 18 - Indice d'occupation des berges des différentes zones de l'amont vers l'aval	33
Figure 19 - Pourcentages de recouvrement par zone des principaux macrophytes (campagne d'avril)	34
Figure 20 - Pourcentages de recouvrement par zone des principaux macrophytes lors des campagnes de juillet (à gauche) et septembre (à droite).	35
Figure 21 - Pourcentages de recouvrement cumulés par zone des campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).....	36
Figure 22 - Indices de diversité de Shannon par zone des campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).	36
Figure 23 - Nombre d'espèces des zones pour les 3 campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).	37
Figure 24 - Pourcentages de variation des recouvrements cumulés sur les stations HB entre avril et juillet (a) et entre juillet et septembre (b).....	37
Figure 25 - AFC du tableau faunistique (93 taxons x 45 relevés). a) Projection des relevés sur le plan F1xF3 avec regroupement des relevés par station (stations restaurées en bleu et non restaurées en rouge). b) Projection des relevés sur le plan F1xF3 avec regroupement des relevés par saison c) Représentation de la position des taxons, regroupés par grands groupes taxonomiques, sur le plan F1xF3.	40
Figure 26 - Évolution des indices d'abondance (a), de richesse taxonomique (b), des pourcentages d'Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) (c) et de Gastéropodes, Oligochètes et Diptères (GOLD) (d) le long du tronçon étudié.	41
Figure 27 - Indice de composition par type de stations et par phase d'échantillonnage. « A » = stations restaurées ; « NA » = stations non restaurées ; « Aval STEP » = station HB1 ; « Phase A » = échantillonnage des habitats marginaux ; « Phase B » = échantillonnage des habitats dominants selon leur habitabilité ; « Phase C » = échantillonnage des habitats dominants au prorata de leur surface de recouvrement.	43
Figure 28 - Évolution des indices de diversité de Shannon (a) et d'équitabilité de Pielou (b) le long du tronçon étudié.....	44
Figure 29 - Indice de structure par type de stations et par phase d'échantillonnage. « A » = stations restaurées ; « NA » = stations non restaurées ; « Aval STEP » = station HB1 ; « Phase A » = échantillonnage des habitats marginaux ; « Phase B » = échantillonnage des habitats dominants selon leur habitabilité ; « Phase C » = échantillonnage des habitats dominants au prorata de leur surface de recouvrement.	45
Figure 30 - Evolution de la moyenne des notes IBGN sur le Vistre à Bouillargues. Le chiffre à l'intérieur des barres correspond au groupe faunistique indicateur moyen. Le fond de couleur correspond aux classes de qualité (rouge : qualité 'mauvaise' ; orange : qualité 'médiocre' ; jaune : qualité 'moyenne' ; vert : qualité 'bonne').	46
Figure 31 - Co-inertie des profils de traits biologiques et des abondances des taxons relevés en septembre 2008, février, mai, juillet et septembre 2009 sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues. a) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par	

station (rouge : stations non restaurées ; bleu : stations restaurées. b) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par saison. c) Position des modalités de 11 traits biologiques sur le plan factoriel F1xF2.....	48
Figure 32 - Co-inertie des profils de traits écologiques et des abondances des taxons relevés en septembre 2008, février, mai, juillet et septembre 2009 sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues. a) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par station (rouge : stations non restaurées ; bleu : stations restaurées. b) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par saison. c) Position des modalités de 11 traits écologiques sur le plan factoriel F1xF2.	49
Figure 33 - Position des relevés regroupés par caractéristique des stations sur les plans factoriels de a) l'AFC faunistique, b) le couplage des informations faunistiques et biologiques et c) le couplage des informations faunistiques et écologiques.	50
Figure 34 - Évolution de la moyenne des indices de diversité taxonomique et fonctionnelle (calculée sur la base des 9 sous groupes bioécologiques) sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues.	51
Figure 35 - Évolution du pourcentage moyen de taxons appartenant aux groupes fonctionnels β (a), γ (b), δ (c) et ζ (d) sur le tronçon du Vistre à Bouillargues.	52
Figure 36 - Intensité des activités EEC. HB1 à HB9: points d'échantillonnage d'aval et amont sur le Vistre (cf figure 1 pour la localisation).	54
Figure 37 - Minéralisation de la matière organique et potentiel d'autoépuration des microorganismes sédimentaires le long du Vistre.....	55
Figure 38 - Densité bactérienne dans les sédiments du Vistre.....	56
Figure 39 - Évolution spatiale et temporelle des masses de biofilms épilithiques.....	57
Figure 40 - Activités enzymatiques d'hydrolyse de la matière organique dans les biofilms du Vistre.	58
Figure 41 - Processus respiratoires dans les biofilms épilithiques du Vistre.	59
Figure 42 - Diversité Bouillargues.....	59
Figure 43 - Fonctions microbiennes vs sites.....	60
Figure 44 - Valeurs des indices IPS et IBD aux différentes stations. Les histogrammes en orange représentent les zones non restaurées, les verts les zones restaurées.	63
Figure 45 - ACP sur les espèces dominantes et répartition des biovolumes et du pourcentage de taxons rhéophiles (Denys, 1991) le long de l'axe 1.	64
Figure 46 - Relation entre les abondances relatives de taxons déformés et l'occupation végétale des berges.....	65
Figure 47 - Indices de diversité de Shannon sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues et abondances relatives des espèces dominantes dans les stations amont.....	66

I - Rappel

I - 1. Contexte

Le Vistre est un cours d'eau côtier qui prend sa source au Nord-Est de Nîmes et qui présente des risques d'inondation, une qualité de l'eau très mauvaise et un milieu naturel à reconquérir. Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône Méditerranée Corse (RMC) de 1996 a inscrit le Vistre parmi les 26 cours d'eau sensibles à l'eutrophisation dans le bassin, qui nécessitent des interventions prioritaires. Il s'agit donc d'un cours d'eau très fortement dégradé, en particulier dans le secteur de Nîmes. En effet, à côté d'impacts liés aux apports diffus agricoles de ce secteur, les rejets domestiques de l'agglomération dégradent fortement le cours d'eau.

Le syndicat mixte du Bassin Versant du Vistre a décidé d'initier un changement radical des politiques d'aménagement et de gestion du bassin versant, pour que les cours d'eau retrouvent un fonctionnement naturel satisfaisant et compatible avec les divers usages de l'eau. Plusieurs travaux ont été réalisés dès 1999 sur ce site (et plus largement sur le Vistre) et ont permis de caractériser l'état physico-chimique du Vistre, d'identifier les zones susceptibles de faire l'objet de travaux de restauration et de proposer des actions concrètes (Cedrat Développement, 1999, 2000, 2001)

Un tronçon du Vistre (7 km en amont de l'ancien rejet de la STEP Nîmes Sud-Ouest) fait actuellement l'objet d'une étude¹ dont l'objectif est **d'évaluer le gain apporté à l'écosystème et à son fonctionnement par des opérations de restauration physique**. L'opportunité d'une bonne maîtrise foncière a permis d'effectuer une restauration complète, recréant les conditions d'un fonctionnement hydraulique et hydrologique comparable à l'état d'origine (méandres, diversité de faciès, inondabilité du lit majeur). Pour cela un linéaire de 2 kilomètres de ce cours d'eau a fait l'objet depuis 2004 d'une restauration physique dans le but de réduire les apports en crue du bassin versant mais aussi les apports en pollution directe et diffuse, et redonner aux cours d'eau une morphologie qui permette un fonctionnement écologique satisfaisant

Les travaux réalisés sur ce site nommé « Bouillargues » (Figure 1) comprennent :

- 1) un reprofilage des berges et une revégétalisation avec des espèces locales adaptées aux conditions hydrauliques afin de fixer les berges, de créer des zones d'ombrage et de recréer une zone tampon entre les terres agricoles et le cours d'eau,
- 2) la création d'un lit d'étiage adapté aux conditions hydrauliques, pour permettre une meilleure oxygénation de l'eau et éviter la prolifération de la végétation aquatique,
- 3) la restauration de la sinuosité du lit du Vistre avec la création de méandres assurant ainsi le ralentissement de la propagation des crues à l'aval, une plus grande diversité des écoulements et améliorant la qualité paysagère du site,
- 4) la création de zones de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre par des terrasses inondables,
- 5) la restauration de zones humides sur 6 ha.

¹ Action 14 de l'Accord Cadre Cemagref - Agence de l'eau RMC 2008-2010

Depuis la réalisation de ces travaux, plusieurs suivis de l'évolution du milieu ont été réalisés (Etude Asconit, étude Ecosphère, étude du lycée de Rhodilhan) qui portaient sur (1) la physico-chimie, les diatomées, les invertébrés, les oligochètes, les poissons, la végétation aquatique ainsi que (2) l'avifaune, les mammifères, les reptiles, les amphibiens et les insectes.

Ce travail est centré sur le cours d'eau proprement dit et non ses marges. Il complète les données précédemment acquises.

I - 2. Objectifs

Les objectifs du projet sont :

- l'étude et la caractérisation de l'évolution de la qualité biologique et physico-chimique d'un cours d'eau dont la qualité hydromorphologique s'est améliorée,
- l'identification des éléments et paramètres de qualité biologiques et physico-chimiques pertinents pour traduire l'amélioration d'un point de vue qualitatif et quantitatif,
- l'identification des améliorations hydromorphologiques les plus favorables à l'expression du potentiel écologique de manière à dégager des préconisations reportables sur d'autres sites.

Ce projet est prévu pour une période 22 mois, sur 2008, 2009 et 2010.

II - Matériels et méthodes

II - 1. Caractérisation du site

Les travaux suivants ont été réalisés sur le site de Bouillargues :

- Reprofilage des berges et revégétalisation avec des espèces locales adaptées aux conditions hydrauliques afin de fixer les berges, de créer des zones d'ombrage et de recréer une zone tampon entre les terres agricoles et le cours d'eau ;
- Création d'un lit d'étiage adapté aux conditions hydrauliques, pour permettre une meilleure oxygénation de l'eau et éviter la prolifération de la végétation aquatique ;
- Restauration de la sinuosité du lit du Vistre avec la création de méandres assurant ainsi le ralentissement de la propagation des crues à l'aval, une plus grande diversité des écoulements (favorable à la vie piscicole) et améliorant la qualité paysagère du site ;
- Création de zones de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre par des terrasses inondables ;

Neuf secteurs ont été définis le long du tronçon étudié (2km), dont 3 non restaurés qui servent de référence (deux sont sous couvert forestier) (Figure 1). Ces sites correspondent aux points d'échantillonnage des invertébrés. Les macrophytes ont été étudiés sur l'ensemble du linéaire. Les échantillons pour la physico-chimie et la microbiologie ont été prélevés sur 5 points : HB1, HB3, HB5, HB7, HB9. Le rejet de STEP a également été échantillonné pour les paramètres chimiques.

L'ensemble des campagnes de mesures prévues dans le cadre de cette convention (hydromorphologie, étude des macrophytes, étude des invertébrés, processus microbiens et physico chimie) a été réalisé.

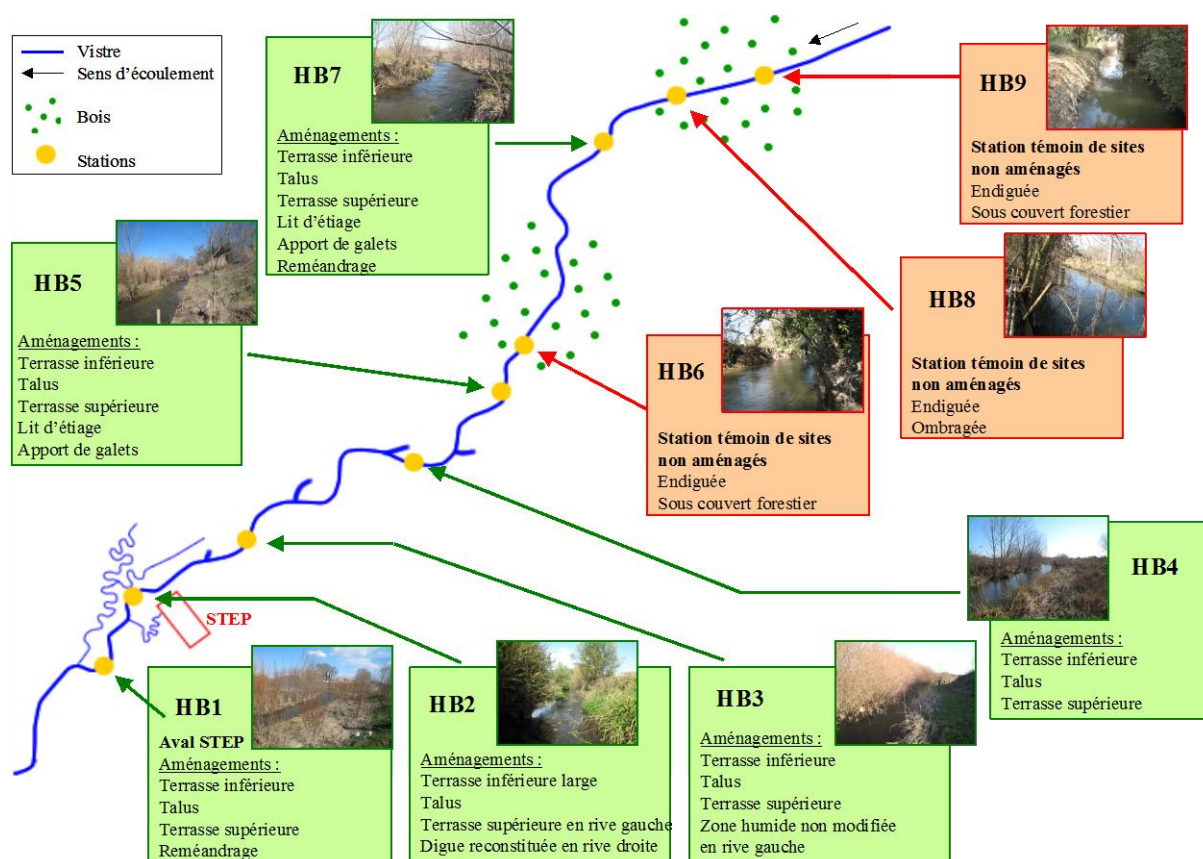


Figure 1 - Schéma général du secteur restauré de Bouillargues avec le descriptif des stations. En rose les zones non restaurées (servant de zone témoin) et en vert les zones restaurées.

II - 2. Bilan hydromorphologique

II - 2.1. Descriptif physique

Afin de répondre rapidement aux besoins de connaissances de l'architecture du milieu, nous avons opté pour une méthode simple dont la mise en œuvre ne nécessite pas l'usage d'outils sophistiqués (une boussole et un distancemètre). Sa mise en œuvre est assurée par deux personnes cheminant par le lit mouillé. Les relevés ont été réalisés fin mars 2008 pour le trajet station d'épuration - confluence Vistre-Buffalon (soit de HB2 à HB9). Un complément a été effectué en octobre 2008, au même débit, sur les 200m en aval du rejet de la station d'épuration de Bouillargues (HB1).

La méthode consiste à approximer les formes fluviales présentes par la découpe du tronçon en quadrilatères successifs. Cette découpe est fondée sur une lecture du paysage aquatique qui combine des éléments préalablement définis pour la description.

Chacun des quadrilatères est déterminé géométriquement par trois couples de mesures :

- la largeur aval et le cap associé,
- la longueur entre les points médians des largeurs amont et aval et le cap associé,
- et la largeur amont et le cap associé (cf. Figure 2).

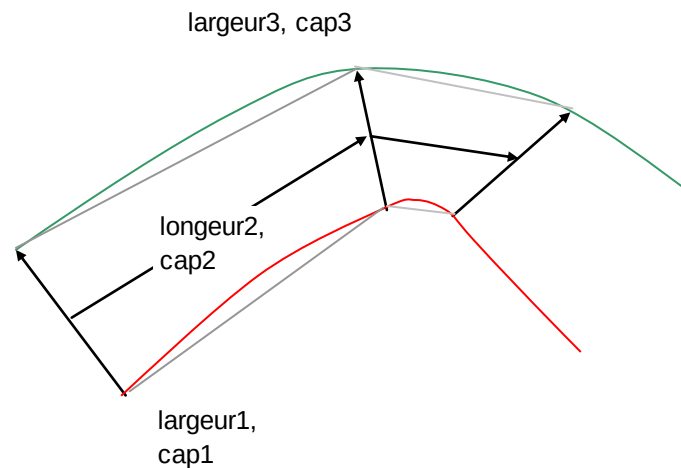


Figure 2 - Principe de description des formes fluviales.

La forme à décrire étant repérée dans ses limites amont et aval, on lui affecte ensuite un certain nombre de variables descriptives dont les modalités figurent dans le Tableau 1.

Seul le type de faciès « radier » a été qualifié *in situ*, car son repérage est défini par un écoulement qui suit clairement une pente marquée du lit de la rivière, les autres faciès découlent de choix de bornes des variables. Dans le cas présent, l'appellation « mouille » a été affectée à des structures dont la profondeur maximale est supérieure ou égale à 60 cm. L'appellation « plat » a donc été affectée au reste des structures non qualifiées en radier ou en mouille.

Les découpes ont été organisées selon la sinuosité du tracé, puis selon les dominantes granulométriques identifiables et les classes dominantes de vitesse d'écoulement. Ainsi une même structure de faciès peut être composée d'éléments amont ou aval voisins.

Le choix préalable des variables a été organisé dans une feuille de fichier Excel que l'on remplit sous format papier sur le terrain (cf. Figure 3). La constitution des fichiers s'effectue ultérieurement par saisies des données ; les variables qualitatives sont renseignées à l'aide de menus déroulants.

Paramètres	Description	Type information
Dimensions (m)	Longueur médiane & largeur des quadrilatères topo	numérique
Orientations (degrés/Nord)	Cap longueur, cap largeur	numérique
Type morpho	Type de faciès	2 types (radier, autre)
V max (cm/s)	veine d'écoulement maximum	numérique
H max (cm)	profondeur maximale	numérique
V moy	Vitesse moyenne (cm/s)	5 classes (bornes: 5, 25, 75, 150)
H moy	Hauteur eau moyenne (cm)	7 classes (bornes: 5, 10, 30, 60,100, 200)
Granulo+	Granulométrie la + grosse	12 classes
Gr_dom	Granulométrie dominante	12 classes
Veg emm	Végétation aquatique émergée	4 types
Veg imm	Végétation aquatique immergée	6 types
Rac	racines, radicelles (% de la zone)	3 classes de % en tenant compte des 2 rives
Nat Riv G & D	Nature des rives	4 types
Ripi Riv G & D	nature Ripisylve & importance	9 modalités
Enc Riv G & D	Encaissement (m)	3 classes

[illegible]

Une évaluation du potentiel d'habitabilité (capacité d'accueil) de la fraction granulométrique dominante, par type de tronçon ou par type de faciès, pourra être réalisée à partir de la hiérarchisation établie pour l'échantillonnage benthique normalisé (Tableau 2).

Tableau 2 - Codes d'habitabilité pour les supports benthiques en eau courante.

SUPPORTS	Classement Habitabilité
Bryophytes-Tuf	11
Hydrophytes	10
Litières	9
Chevelus racinaires	8
Pierres-Galets (CG, PF, PG)	7
Blocs (>256 mm)	6
Granulats grossiers (GF, GG, CF)	5
Hélophytes	4
Vase	3
Sable Limon (4 μ -2mm)	2
Algues	2
Dalle, Rocher, Roche-mère	1

Le bilan hydromorphologique n'a concerné que le milieu minéral constitutif du tronçon étudié. Par ailleurs, sachant qu'une étude spécifique aux macrophytes était réalisée, nous avons uniquement pointé la présence ou l'absence de végétaux dans les structures décrites.

Enfin, une série de calculs intégrés à une feuille de calcul, permettent de transformer les informations géométriques (caps, distances) en :

- coordonnées (x, y) des rives et des points médians de chacune des transversales. Par convention le premier point médian de la première transversale est affecté des coordonnées 0,0.
- surface pour chaque quadrilatère.

NB : une option de colonne dans le fichier permet de spécifier, si la visée du cap a eu lieu en rive droite ou en rive gauche.

II - 2.2. Régime thermique printanier et estival

Les données ont été obtenues par la mise en œuvre de capteurs-enregistreurs de marque HOBO², programmés au pas de temps 15 minutes. Les capteurs sont placés dans des ambiances hydrauliques où le courant est présent. Afin de tester l'influence éventuelle des modalités de restauration du tracé du lit sur le bilan thermique, quatre implantations ont été choisies dans le tronçon :

² HOBO® Water Temp Pro V2

- un amont du premier secteur boisé et de la confluence du Buffalon = « un témoin Vistre amont ». Le capteur a été fiché au milieu du chenal en aval du pont devant un point dur (Photo 1).

- un aval du premier secteur boisé, correspondant à l'amont du premier secteur restauré = « effet secteur boisé non-restauré ». Le capteur a été fixé près du fond à un mètre de la rive gauche sur un pieux noyé.

Photo 1 : Emplacement de l'enregistreur de température « Vistre amont »



- un aval du premier secteur restauré = « effet nouveau tracé ». Le capteur a été fixé près du fond au milieu du chenal en abri hydraulique de gros blocs enchâssés dans les sédiments.

- un aval du tronçon et en amont du rejet de la station de dépollution = « un témoin Vistre aval ». Le capteur a été fixé en rive gauche près du fond sur le système racinaire de la ripisylve (Photo 2).



Photo 2 : Emplacement de l'enregistreur de température « Vistre aval »

Les enregistrements ont été effectués du 27 mars 2008 au 23 octobre 2008.

II - 3. Mesures chimiques

II - 3.1. Échantillonnage

Les échantillons d'eau, de sédiment et de biofilm ont été prélevés sur 5 des 9 sites HB : HB1, HB2, HB5, HB 7 et HB 9. Des mesures sur la qualité d'eau ont également été effectuées sur le rejet de la station d'épuration (entre HB1 et HB2).

Les échantillons d'eau sont prélevés en instantané le jour de l'échantillonnage, soit en septembre 2008, février, avril, juillet, septembre, novembre 2009 et Avril 2010, puis conservés au frais (glacière) jusqu'au retour au laboratoire pour analyse.

Les sédiments ne sont pas présents systématiquement sur toutes les stations (selon l'historique de crue qui modifie plus ou moins le substratum de la rivière) et le substratum majoritaire du Vistre dans ce secteur est la marne qui constitue un fond dur et compact. Les sédiments prélevés correspondent le plus souvent aux dépôts particuliers au sein des massifs de macrophytes.

II - 3.2. Paramètres et protocoles analytiques

La chimie de l'eau a été caractérisée par l'analyse des nutriments en suivant les protocoles standardisés en vigueur au laboratoire de chimie du Cemagref (cf. Tableau 3).

Tableau 3 - Paramètres chimiques analysés sur le site de Bouillargues et méthodes employées

Paramètre analysé	Unité	Méthode
Température <i>in situ</i>	°C	Conductimètre LF 330 (WTW)
Conductivité <i>in situ</i>	µS/cm	Conductimètre LF 330 (WTW)
pH <i>in situ</i>		pH-mètre : pH 330 (WTW)
O ₂ <i>in situ</i>	mg/l	Oxymètre : OXY 330 (WTW)
pH		NF T 90-008
Conductivité	µS/cm	NF EN 27888
COT (eau brute)	mg/l	NF EN 1484
COD (eau filtrée)	mg/l	NF EN 1484
Ammonium	mg/l NH ₄ ⁺	NF T 90-015-2
Nitrite	mg/l NO ₂ ⁻	NF EN 26777
Nitrate	mg/l NO ₃ ⁻	NF EN ISO 10 304
Phosphore Total	mg/l P	NF EN ISO 6878
Orthophosphate	mg/l PO ₄ ³⁻	NF EN ISO 6878
Hydrogénocarbonate	mg/l HCO ₃ ⁻	NF EN ISO 9963-1
Chlorures	mg/l Cl ⁻	NF EN ISO 10 304
Sulfates	mg/l SO ₄ ²⁻	NF EN ISO 10 304
Silice	mg/l SiO ₂	NF T 90-007
Calcium	mg/l Ca ²⁺	NF EN ISO 14 911
Magnésium	mg/l Mg ²⁺	NF EN ISO 14 911
Sodium	mg/l Na ⁺	NF EN ISO 14 911

En complément, les sédiments ont été caractérisés sommairement (granulométrie, MO) (cf. annexe 1)

II - 3.3. Traitement des données

Système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ-eau)

Pour chaque valeur de paramètre mesuré, nous avons attribué, par station et par date le code couleur correspondant aux classes de qualité de l'eau du SEQ-Eau, version 2 (MEED & Agences de l'eau 2003).

Analyse en composantes principales (ACP)

Le tableau regroupant toutes les données de chimie (valeurs numériques des paramètres mesurés) est analysé au moyen d'une ACP normée. Les représentations graphiques de cette analyse permettent d'apprécier les relations linéaires entre les paramètres chimiques et les ressemblances entre les relevés.

Le nombre important de paramètres par rapport au nombre de relevés nous a obligé à réduire progressivement la taille du tableau de données.

Notre cheminement a été le suivant :

- (i) du fait de l'absence d'analyses effectuées en février 2009 sur les stations HB7 et HB9, la campagne de février 2009 n'est prise en compte pour aucune des stations
- (ii) du fait de l'absence d'analyses chimiques effectuées en septembre 2008 et février 2009 sur la station HB7, la station HB7 n'est pas prise en compte
- (iii) présentant des valeurs globalement très différentes de celles mesurées dans le Vistre, les données relatives au rejet de la STEP ne sont pas prises en compte. En effet le rejet de la STEP est très individualisé via cette analyse (ce qui est normal puisque son objectif est de mettre en évidence les différences/ressemblances entre stations), par conséquent les représentations graphiques sont tirées par ce point. Par ailleurs, notre objectif premier était de mettre en évidence de potentielles différences le long du linéaire du Vistre lui même et non pas par rapport à la STEP.
- (iv) certains paramètres étant fortement auto-corrélés (cf. matrice des corrélations en annexe 2), nous n'avons gardé qu'un seul paramètre parmi chaque groupe de paramètres auto-corrélés.

L'analyse finale est une ACP [24 relevés (= 4 stations x 6 campagnes) x 7 paramètres] sur les nitrites, les nitrates, l'ammonium, les orthophosphates, l'oxygène dissous, les chlorures et le pH.

II - 4. Macrophytes

Quatre campagnes de terrain ont été réalisées sur le secteur :

- 21-24 avril 2008 : campagne destinée à avoir un premier relevé de végétation
- 26-29 mai 2008 : campagne complémentaire (focalisée sur le développement des jussies)
- 15-18 juillet 2008 : campagne destinée à évaluer l'évolution saisonnière de la répartition des macrophytes
- 22- 25 septembre 2008 : campagne complémentaire destinée à cette même évaluation.

II - 4.1. Relevé général le long du profil longitudinal

Protocole : La première étape de l'étude des macrophytes a consisté à observer et à noter la présence des espèces dominantes sur l'ensemble du secteur restauré. Nous avons procédé par relevé de zones végétales "homogènes" : les changements de zone ont été fixés en prenant comme référence géographique les changements de physionomie végétale. Ce protocole spécifique visait au meilleur compromis entre opérationnalité (temps nécessaire au relevé) et pertinence de l'information recueillie. Sur les 1,8 Km du secteur restauré, il a conduit à délimiter 34 zones. Au sein de chaque zone et pour chaque espèce le pourcentage de recouvrement et l'occupation végétale terrestre des berges droite et gauche ont été déterminés. L'observation et le relevé ont été faits en remontant le courant (de l'aval vers l'amont) pour éviter de perturber le milieu avant l'observation (dérive de plante ou fragment, turbidité).

Matériel utilisé : Le matériel utilisé sur le terrain est un aquascope (destiné à mieux observer le fond de la rivière), un râteau (pour les prélèvements éventuels des végétaux), des sacs plastiques et des piluliers avec des étiquettes indiquant le site et la date pour conservation des échantillons prélevés avant identification au laboratoire). Un GPS de précision métrique (Trimbel pro-XRS) a permis l'enregistrement du positionnement des limites de zone et des coordonnées de certains points caractéristiques (tels que les coins de bâtiment) pour le géo référencement de la carte (SIG) ; une bombe de peinture a également été utilisée pour matérialiser l'amont et l'aval des zones par des marquages.

Repérage de terrain : Une carte du site, issue des plans du projet de travaux de réaménagement, nous a été fournie par la Direction Départementale de l'Agriculture du Gard. Après simplification, elle a été géoréférencée (extension « géoréférencement et transformation » sous ArcView). Les limites des différentes zones déterminées sur le terrain en fonction des changements de physionomie végétale sont symbolisées par les points rouges sur la figure 4.

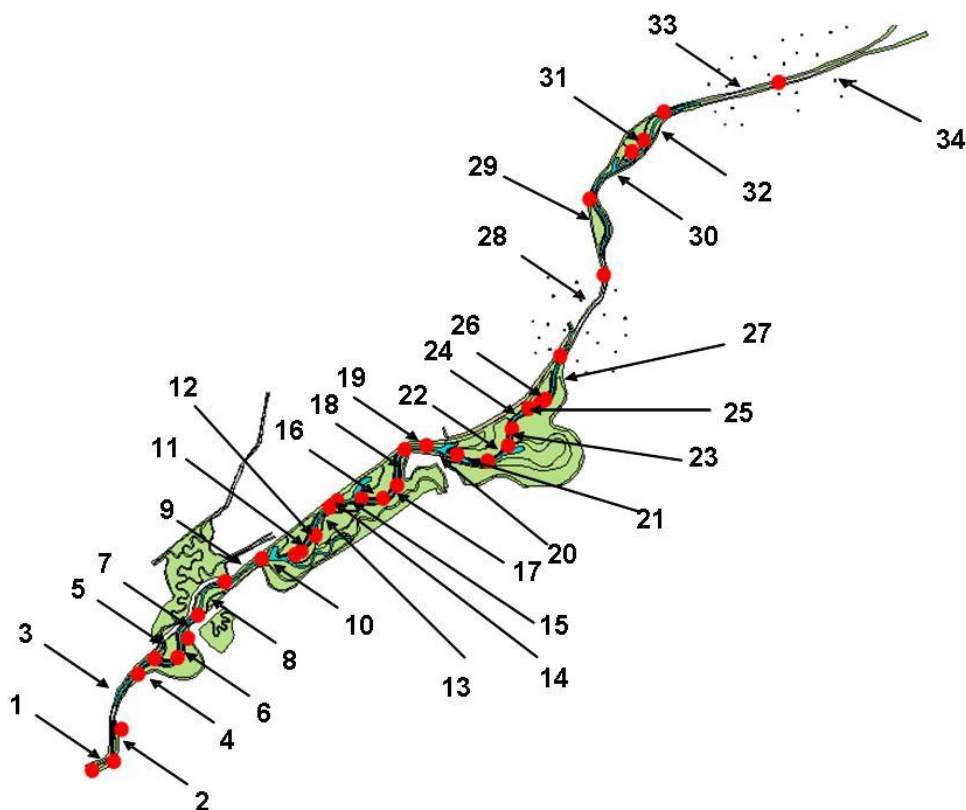


Figure 4 - Limites et numérotation des zones de relevé floristique

Acquisition et traitement des données

Les données concernant le substrat et la vitesse du courant ont été obtenues par l'étude hydromorphologique. Plusieurs zones ont été délimitées (168 en tout) en fonction des changements de substrat. Après calcul et importation des coordonnées géographiques des limites de zones sous SIG, les correspondances entre les coordonnées des « zones habitats » et des « zones macrophytes » ont été établies.

Étant donné que la superficie de chacune des zones de substrat est connue, le pourcentage de chaque type de substrat caractérisant chacune des zones « macrophytes » a ensuite été calculé.

En ce qui concerne la vitesse, des valeurs moyennes des vitesses des zones « habitats » ont été calculées pour chacune des zones « macrophytes ». Pour faciliter la comparaison ultérieure avec les autres paramètres, les classes déterminées par les mesures d'hydromorphologie ont été numérotées de 1 à 3 :

- de 5 à 25 cm/s : classe 1
- de 25 à 75 cm/s : classe 2
- de 75 à 150 cm/s : classe 3

L'occupation des berges a été déterminée grâce au relevé effectué sur le terrain décrivant l'occupation des berges droite et gauche de chacune des zones. Déclinées en 5 classes, trois strates végétales ont été définies :

- strate herbacée
- strate arbustive subdivisée en "petits arbustes" et "grands arbustes",
- strate arborescente subdivisée en "petits arbres" et "grands arbres",

La strate "petits arbustes" inclus aussi les ronciers, mégaphorbiaies et les grands hélrophytes comme les roseaux. L'importance relative de chaque strate dans l'occupation végétale des berges a été notée pour chaque zone, en distinguant rive droite et gauche : une notation de 1 à 4 a été utilisée, 4 étant la valeur maximale.

A partir des données notées sur le terrain, un indice d'occupation végétale des berges a été calculé sur les bases suivantes : dans le but de bien différencier chacune des strates, un coefficient distant de 2 entre chaque strate et distant de 0,5 entre deux classes au sein d'une même strate a été affecté à chacune des classes, soit :

- 1 pour la strate herbacée,
- 3 pour la classe "petits arbustes" de la strate arbustive et 3,5 pour la classe "grands arbustes",
- 5,5 pour la classe "petits arbres" de la strate arborescente et 6 pour la classe "grands arbres".
- Les valeurs d'indice obtenues par ce mode de calcul s'étendent de 12 à 70. Pour faciliter la comparaison ultérieure avec les autres paramètres, le résultat brut est rapporté à une échelle de 0 à 10 à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Indice d'occupation des berges} = [(\text{Indice d'occupation des berges} - 12) / 70] \times 10$$

II - 4.2. Étude détaillée

Sur chacune des neuf stations communes aux investigations sur les diatomées, les macrophytes, les invertébrés et l'activité bactérienne, à la localisation précisée lors d'un repérage réalisée le 26 mars 2008, un relevé plus précis de 50 m de longueur a été réalisé (points HB pour "hydrobiologie").

La méthode de prospection et le matériel utilisé sont les mêmes que dans le cas du relevé général. Les zones ont été mesurées à l'aide d'un Topofil et positionnées de manière à échantillonner une zone de végétation homogène.

Utilisant le protocole IBMR, le relevé est plus précis que pour l'étude du profil longitudinal, toutes les espèces étant présentes dans les limites de la surface en eau étant relevées.

Les limites précises de ces zones ont été matérialisées sur le site et leurs coordonnées ont été relevées précisément au GPS (Figure 4).

II - 5. Invertébrés

Cinq campagnes de terrain ont été réalisées sur les points HB1 à HB9 (septembre 2008, février, mai, juillet et septembre 2009) dans le but de réaliser un suivi spatio-temporel des communautés d'invertébrés.

Les macro-invertébrés benthiques ont été échantillonnés selon le protocole mis en place dans le réseau de contrôle de surveillance (RCS) (issu de la circulaire DE/MAGE/BEMA 07/n°4 parue au Bulletin Officiel le 11 avril 2007). Il a l'avantage de pouvoir à la fois (i) estimer l'aptitude du milieu à héberger des macro-invertébrés et (ii) être représentatif des habitats les plus présents. Il autorise également, en ne prenant en compte qu'une partie seulement des prélèvements réalisés sur une station, le calcul d'une note IBGN équivalente à celle obtenue en appliquant rigoureusement le protocole IBGN (AFNOR, 2004). Ceci permet de garantir la continuité du suivi par rapport aux études précédemment réalisées.

II - 5.1. Prélèvement des organismes

Les macro-invertébrés sont échantillonnés à l'aide d'un filet de type Surber (0,5 mm de vide de maille, surface échantillonnée : 1/20 de m²). 8 prélèvements sont réalisés sur les substrats dominants (i.e. substrats dont la surface de recouvrement est estimée supérieure à 5% de la surface totale de la station) et 4 sur les substrats marginaux (i.e. substrats dont la surface de recouvrement est estimée inférieure ou égale à 5% de la surface totale de la station).

Ces douze prélèvements sont en fait répartis selon trois phases d'échantillonnage de 4 prélèvements. La première phase consiste à échantillonner 4 habitats marginaux suivant l'ordre décroissant de leur habitabilité (fourni par le protocole, cf. Tableau 4). Les 2^{ème} et 3^{ème} phases consistent à échantillonner les habitats dominants : pour la phase 2, selon leur habitabilité et pour la phase 3, en privilégiant la représentativité des substrats présents.

Chaque phase analysée de manière indépendante va nous apporter des précisions supplémentaires quant à la structure et la composition des communautés benthiques :

- l'exploitation des habitats marginaux, va nous apporter des informations sur la sensibilité du milieu. En effet, la plupart du temps ces habitats sont les plus biogènes et ils abritent donc les taxons les plus sensibles.
- l'exploitation des habitats dominants va nous donner l'image moyenne du peuplement, c'est à dire une image plus représentative de la station de la qualité réelle de la station (et non plus de son potentiel).

Tableau 4 - Définition et ordre d'échantillonnage des substrats.

Définition du substrat	Habitabilité	Protocole de prélèvement
Bryophytes	11	Végétal seul (sur bloc) ou avec élément support (sur cailloux)
Spermaphytes immergées (hydrophytes)	10	Inclut la couche superficielle du sédiment
Débris organiques grossiers (litière)	9	Inclut la couche superficielle du sédiment
Chevelus racinaires, supports ligneux	8	Végétal seul
Sédiments minéraux de grande taille (pierres, galets) (25 à 250 mm)	7	Inclut les différentes classes granulométriques de sédiments
Blocs (>250 mm) inclus dans une matrice d'éléments minéraux de grande taille (25 à 250 mm)	6	Inclut les sédiments et la faune associés au bloc (abris sous bloc)
Granulats grossiers (graviers) (2 à 25 mm)	5	Inclut les différentes classes granulométriques de sédiments
Spermaphytes émergents de strate basse (hélophytes)	4	Inclut la couche superficielle du sédiment
Vases : sédiments fins (<0,1 mm) avec débris organiques fins	3	Couche superficielle du sédiment (<3 cm)
Sables et limons (<2 mm)	2	Couche superficielle du sédiment (<3 cm)
Algues	1	Inclut les éléments minéraux du support
Surfaces uniformes dures naturelles et artificielles (roches, dalles, marnes et argiles compactes)	0	Raclage de surface

La hauteur d'eau et la classe de vitesse du courant (4 classes : nulle, lente, moyenne et rapide) ont été relevées pour chacun des 12 prélèvements sur chaque station.

Chaque prélèvement est stocké indépendamment. Les échantillons sont conservés dans du formaldéhyde à 4% de concentration finale.

II - 5.2. Traitement des échantillons au laboratoire

Chaque échantillon est rincé à l'eau au moyen d'une colonne de trois tamis (2,5 mm, 1,25 mm, 0,5 mm), sous hotte aspirante. Le tri et l'identification sont réalisés dans de l'eau, sous loupe binoculaire (Leica MZ 125).

Les individus récoltés sont identifiés selon les critères fournis par la circulaire DE/MAGE/BEMA 07/n°4 (2007), c'est à dire au genre à l'exception des Diptères (famille) et des Oligochètes (classe). L'ouvrage de référence utilisé est le guide « Invertébrés d'eau douce – Systématique, biologie, écologie » (Tachet *et al.* 2000) ainsi que Müller-Liebenau (1969) pour les Baetidae, Nilson (1996) pour tous les taxons et Waringer & Graf (1997) pour les Trichoptères.

II - 5.3. Traitement des données

L'analyse des données a été réalisée à partir du tableau général d'abondance des taxons par station et par saison (127 taxons x 9 stations x 5 campagnes). Avant l'analyse, les données relatives aux taxons dont l'occurrence est égale à 1 et l'abondance inférieure à 5 sont retirées du jeu de données afin de ne pas donner un poids trop important à des taxons rares.

Les données sont analysées à l'échelle globale de la station (i.e. 12 prélèvements confondus) et par phase (i.e. par groupe de 4 prélèvements) sous deux approches, taxonomique et fonctionnelle. Chaque approche fait l'objet d'analyses multivariées et indicielles.

II - 5.3.1 Approche Taxonomique

- **Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)**

L'analyse multivariée se résume ici en une AFC qui permet de rassembler sur un espace de dimension réduite la plus grande partie de l'information contenue dans un tableau (i.e. composition taxonomique). Elle décrit de façon globale les associations qui peuvent exister entre deux ensembles de données représentés par les lignes et les colonnes du tableau et permet de repérer visuellement l'influence de différents facteurs sur la composition des communautés. Les données d'abondance de chaque taxon ont été transformées en $\log(x+1)$. Cette transformation permet de réduire les disparités numériques entre les taxons à forts et faibles effectifs tout en conservant l'effet de l'abondance.

L'AFC a été réalisée sur le tableau initial des données faunistiques comprenant les abondances de 94 taxons pour les 45 prélèvements réalisés (9 stations x 5 campagnes).

- **Indices**

L'analyse indicielle se base sur le calcul des indices suivant :

- l'abondance (Q) : nombre total d'individus capturés,
- la richesse taxonomique (S) : nombre de taxa différents rencontrés,
- le pourcentage d'EPT (Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères) en termes d'individus (abondance),
- le pourcentage de GOLD (Gastéropodes, Oligochètes, Diptères) en termes d'individus (abondance),
- la diversité de Shannon et Weaver (1963) : $H' = -\sum(p_i \cdot \log_2 p_i)$, avec p_i l'abondance relative du taxon i ,
- l'indice d'équitabilité de Pielou (1966) : $J' = H'/H'_{\max}$, avec $H'_{\max} = \log_2 S$,
- un équivalent IBGN : une note équivalente à l'indice biologique global normalisé est calculée d'après la norme AFNOR NF T 90-350 (2004) sur la base de la richesse taxonomique et du groupe faunistique indicateur [seuls les 8 prélèvements correspondants aux phases 1 et 2 de l'échantillonnage RCS (i.e. 8 habitats échantillonnés selon leur habitabilité) sont pris en compte pour ce calcul].

II - 5.3.2 Approche Fonctionnelle

L'organisation des caractéristiques bio-écologiques est réalisée suivant Tachet et al. (2000). Le tableau de traits utilisé contient 117 modalités pour 22 traits (cf. Annexe 3). Les caractéristiques bio-écologiques sont enregistrées en codage flou. Cela permet d'attribuer, à chaque unité systématique composant la communauté d'invertébré, une note positive, variant de 0 à 5, décrivant l'affinité du taxon pour chacune des modalités caractérisant un trait écologique ou biologique. Ces notes sont obtenues à partir des données issues de la bibliographie. Une note d'affinité de 0 équivaut à une affinité nulle du taxon envers cette modalité, tandis qu'une note d'affinité de 5 équivaut à une affinité maximale du taxon pour cette modalité.

En termes d'analyse, pour donner le même poids à chaque trait, la somme des notes d'affinités des modalités d'un trait est ramenée à 1.

• Profils bio-écologiques

Sur la base du tableau des relevés faunistiques et du tableau des affinités des taxons pour chaque modalité de trait, le profil bio-écologique d'une station pour un trait donné est obtenu en calculant la distribution de fréquences relatives des sommes de notes d'affinité des taxons de la communauté pour les modalités du trait correspondant. Chaque note d'affinité a été pondérée par l'abondance dans le relevé du taxon présent correspondant. Les distributions de fréquences relatives ont été représentées sous forme d'histogrammes. Ces profils de station pour chaque trait permettent d'observer quelles modalités varient à la fois dans le temps et dans l'espace.

• Analyse de Co-Inertie

L'analyse de co-inertie (Dolédec & Chessel, 1994) est utilisée pour confronter la structure faunistique d'une communauté à ses caractéristiques bio-écologiques. Il s'agit de coupler le tableau faunistique de départ contenant les abondances des taxons, avec le tableau des traits bio-écologiques contenant les notes d'affinité des taxons pour les variables. La structure commune qui permet ce couplage est la liste des taxons.

Les abondances des taxons ont été transformées en $\log(x+1)$.

L'analyse de co-inertie a été réalisée en couplant le tableau initial des données faunistiques (94 taxons x 45 relevés) avec d'une part celui contenant les informations biologiques (94 taxons x 11 traits soit 62 modalités), et d'autre part, avec celui contenant les informations écologiques (94 taxons x 11 traits soit 55 modalités).

- **Diversité Fonctionnelle**

La diversité fonctionnelle peut être considérée comme une traduction numérique de la diversité des solutions et/ou des réponses bio-écologiques adoptées par une communauté dans un contexte environnemental donné.

Ici, la diversité fonctionnelle est abordée en termes de traits biologiques et écologiques. Plus précisément, elle se base sur la répartition des organismes d'une communauté à l'intérieur de différents groupes constitués par des taxons considérés comme homogènes quant à leurs caractéristiques biologiques et écologiques. En effet, en 2001, Usseglio-Polatera *et al.* (2001) ont réalisé une classification de 472 macro-invertébrés benthiques basée sur les traits bio-écologiques. Il en est ressorti 6 groupes, 9 sous-groupes et 43 unités d'invertébrés ayant des combinaisons de traits biologiques et écologiques les plus similaires possibles.

La répartition des différents organismes dans ces groupes s'explique principalement par leurs caractères reproducteurs (voltinisme, techniques de reproduction, dispersion, respiration, alimentation et habitudes alimentaires). Cette organisation des traits biologiques correspond à des organismes dont les combinaisons de traits devraient être plus particulièrement appropriées à des conditions de chenal principal vers des marais ou zones très lenticques et à des conditions allant de celles du crénon vers celles du potamon. (cf. Tableau 5).

Tableau 5 - Principales caractéristiques biologiques et écologiques des 6 groupes bio-écologiques définis par Usseglio-Polatera *et al* (2001).

	Groupe α	Groupe β	Groupe γ	Groupe δ	Groupe ε	Groupe ζ
Taille	Moyenne	Petite à moyenne			Petite	Grande
Voltinisme	Mono ou semi voltins			Polyvoltins	Uni-plurivoltins	Uni-plurivoltins
Respiration	Aquatique	Aquatique (tégumentaire)		Aquatique et aérienne	Aérienne	Branchiale ou tégumentaire
Technique de reproduction	Œufs isolés, pontes fixées	Œufs isolés, pontes fixées		Variées		Ovovivipare ou asexuée
Locomotion	Rampants	Rampants		Rampants, nageurs	Rampants, nageurs	
Habitudes alimentaires	Racleurs, broyeurs	Racleurs, broyeurs		Perceurs, broyeurs, prédateurs		Filtreurs, collecteurs
Alimentation préférée	Microphytes, végétaux, macro-invertébrés	Microphytes, végétaux, macro-invertébrés		Macro-invertébrés		Fines particules organiques ou détritus
Substrats préférés	Minéraux de grande taille		Très large spectre	Large spectre avec préférence pour les substrats organiques en milieux lenticques	Tous : pas de préférence	Sable, limon
Distribution longitudinale	Crénon	Rithron	Rithron, Potamon			
Altitude /	Montagne	Piedmont, plaine	Plaine	Plaine		
Eutrophisation du milieu	Oligotrophe	Oligo-mésotrophe			Eutrophes	
Niveau saprobique		Oligo-mésosaprobe	β -mésosaprobe	β -mésosaprobe	β à α -mésosaprobe	Polysaprobe
Remarques générales	Taxons typiques des conditions rhéophiles	Taxons se rencontrant surtout dans les zones de chenal ou berges	Taxons colonisant plutôt les zones lenticques des rivières, marais ou les étangs		Taxons typiques des zones très lentes	La plupart des taxons invasifs se retrouvent dans ce groupe

Nous avons associé à chaque taxon de la liste faunistique le groupe, sous groupe et unité bioécologique selon Usseglio-Polatera *et al*. (2001). Les taxons non répertoriés dans la classification des auteurs n'ont pas été pris en compte (Menetus et Hydracariens). Les taxa présentant un niveau d'identification moins élevé (souvent à la famille) que dans la classification (souvent au genre) ont été classés comme suit :

- (i) si tous les genres qui appartiennent à une famille émargent dans le même groupe fonctionnel, ce groupe est attribué à la famille,
- (ii) sinon le groupe attribué est celui qui est dominant au sein des différents genres,
- (iii) ou bien, le groupe attribué à la famille est celui du genre le plus fréquemment rencontré au niveau de la zone biogéographique échantillonnée,
- (iv) si aucun groupe ne peut être attribué, le taxon est retiré de l'analyse.

Au final, 83 taxons ont pu être associés à un groupe sur les 94 de la liste initiale.

La fréquence relative des différents groupes bioécologiques présents par station et par date ainsi que l'indice de diversité de Shannon (calculé sur la base de la distribution des taxons dans les différentes sous-groupes bioécologiques) ont été calculées pour chaque station.

Afin de pouvoir comparer les diversités fonctionnelles et taxonomiques, l'indice de diversité taxonomique a été recalculé d'après la liste faunistique comprenant seulement les 83 taxons utilisés dans l'analyse fonctionnelle.

II - 6. Processus biochimiques microbiens

II - 6.1. Échantillonnage

Cinq sites ont été échantillonnés pour prélèvement benthique (sédiment ou biofilm). Sur chaque site les sédiments et le biofilm sont prélevés en triplicats pour chacun des paramètres mesurés. Les cailloux prélevés pour l'étude du biofilm ont une taille comprise entre 1 et 3 cm et sont non enfoncé dans la marne. Les sédiments prélevés à la spatule le sont en surface des zones dépôts (prof < 5cm). Tous les échantillons sont conservés au frais en glacière jusqu'à l'analyse au laboratoire (48 h maxi). Quatre campagnes ont été réalisées: septembre 2008, juin 2009, septembre 2009, novembre 2009.

En complément, quelques analyses microbiennes sur des échantillons de marne ont été réalisées à titre de comparaison. Les biofilms périphytiques sont également assez peu présents, le substratum de gravier étant réparti de façon irrégulière dans le secteur étudié.

II - 6.2. Paramètres et protocoles analytiques

Deux grandes familles de paramètres microbiens sont mesurées :

- Des activités enzymatiques impliquées dans la dégradation de la matière organique et contribuent à l'autoépuration du système, en hydrolysant des molécules complexes de grandes tailles en petites molécules, qui seront alors disponibles pour le métabolisme microbien et partiellement minéralisées ou transformées en composés gazeux. Trois enzymes sont étudiées: la glucosidase et la xylosidase, qui dégradent des composés organiques carbonés et l'aminopeptidase, qui dégrade des composés organiques azotés (de type polypeptides).

- Des processus microbiens plus complexes, qui font appel à des chaînes enzymatiques fonctionnant en cascade ou en parallèle, voire à des populations bactériennes spécialisées. Ces processus conduisent à la minéralisation complète de la MO et produisent des composés gazeux : CO₂ et CH₄, respectivement en conditions aérobies et anaérobies, pour les composés carbonés ; N₂O, en condition anaérobie, au départ de composés azotés de type nitrate ou nitrite.

En complément, la biomasse microbienne des biofilms a été caractérisée.

Protocole de mesure :

La biomasse périphytique a été mesurée par calcul du poids sec sans cendre (AFDW). 2 ml de suspension de biofilm sont filtrés à travers des filtres individuels

préalablement séché (filter Watman, 25mm, fibre de verre, porosité 1,2µm). Chaque filtre est séché 24 h à 105 °C et pesé afin de calculer le poids sec. Les filtres sont ensuite brûlés à 480°C (four Anbertherm P320) pendant 1 h et pesés à nouveau après refroidissement (en dessiccateur) pour obtenir le poids de la matière minérale. La biomasse est calculée en soustrayant la matière minérale du poids sec total. Les résultats sont exprimés en mg/cm².

Les trois enzymes β -D glucosidase (β Glu), β -xylosidase (β Xyl) et leucine aminopeptidase (Lap), sont analysés selon le protocole de Romani et al (2004). Les activités sont mesurés en fluorimétrie en utilisant des substrats analogues (4-methyl-umbelliferyl- β -d-glucopyranoside (750µM), 4-methyl-umbelliferyl-xylopyranoside (1000 µM) and l-leucine-4-methylcoumarinyl-7-amide HCl (1000 µM), respectivement) pour déterminer au préalable les conditions expérimentales (concentrations de saturation). Pour chaque essai, 6ml de solution de substrat sont ajoutés aux échantillons de biofilm (biofilm non gratté, soit un caillou par tube). L'incubation est de 30 minutes, à l'obscurité à 20°C, sous agitation douce. Un contrôle, tué au formaldéhyde (formol 40%) est également incubé pendant 30 minutes. Des blancs sont également préparés avec de l'eau de rivière filtrée. Les incubations sont stoppées en plongeant les tubes dans de l'eau bouillante, et chaque tube est ensuite centrifugé pendant 10 minutes à 5000g. Les produits fluorescents issus de l'hydrolyse enzymatique sont mesurés après ajout de tampon glycine 0,05M, pH 10.4, sur un lecteur de microplaques –fluorimètre (SAFIRE, TECAN), avec une longueur d'ondes d'excitation de 663nm et d'émission de 441nm pour le MUF et de 343 (excitation) et 436 (émission) pour le MCA. La quantification est achevée avec l'utilisation d'une solution standard de MUF et MCA (courbe étalon de fluorescence). L'intensité de fluorescence des blancs, ainsi que celle des contrôles, est soustraite de tous les échantillons pour correction de l'hydrolyse chimique. Les résultats sont exprimés en nmol de composés hydrolysés par heure et par cm² de surface pour le biofilm.

Pour les mesures en sédiment, le protocole est le même, avec incubation de 1g de sédiment par tube. Les résultats sont exprimés en nanomol de substrats hydrolysés par heure et par gramme de sédiment sec.

II - 7. Diatomées

II - 7.1. Echantillonnage

Neuf échantillons de diatomées collectés sur substrats naturels (galets lotiques), dans les stations HB1 à 9 et fixés au formol sur le terrain, ont fait l'objet d'inventaires au niveau spécifique en vue d'apprécier la qualité des eaux.

Tableau 6 – Références des échantillons des diatomées collectées

PREPN°	RIVIERE	SITE	SUPPORT	DATE
15666	Vistre	HB1	galets	05/09/2008
15667	Vistre	HB2	galets	05/09/2008
15668	Vistre	HB3	galets	05/09/2008
15669	Vistre	HB4	galets	05/09/2008
15670	Vistre	HB5	galets	05/09/2008
15671	Vistre	HB6	galets	05/09/2008
15672	Vistre	HB7	galets	05/09/2008
15673	Vistre	HB8	galets	05/09/2008
15674	Vistre	HB9	galets	05/09/2008

II - 7.2. Traitement des échantillons au laboratoire

Au laboratoire, l'identification des diatomées présentes dans les échantillons de périphyton a été réalisée d'après l'examen microscopique de leur squelette siliceux, rendu possible par un traitement permettant de débarrasser les échantillons d'une grande partie des matières organiques. Le protocole normalisé AFNOR (NF EN 13946) préconise un nettoyage par digestion de la matière organique : un traitement des échantillons formolés à l'eau oxygénée (H₂O₂, 30%) bouillante de 10 minutes permet de dégrader la matière organique. Un deuxième traitement, à l'acide chlorhydrique (HCl, 35%) bouillant pendant 5 minutes est parfois nécessaire pour obtenir un nettoyage satisfaisant des frustules. Les résidus d'eau oxygénée et d'acide sont éliminés par des cycles successifs de centrifugations (5 minutes à 2500g) et de rinçages à l'eau distillée. Une partie aliquote est déposée sur une lamelle propre et déshydratée par séchage. La lamelle est ensuite retournée sur une goutte de résine réfringente, le Naphrax® (Brunel Microscopes Ltd, UK), déposée au préalable sur une lame, le chauffage permet de chasser les bulles d'air et d'aboutir à la fabrication de lames permanentes.

L'identification des diatomées se fait par l'observation en microscopie photonique (au grossissement x1000) des lames préparées, selon la norme NF EN 14407 (2004). L'effort de détermination porte sur 400 valves au minimum.

Les identifications ont été effectuées à partir des ouvrages de la Süßwasserflora (Krammer & Lange-Bertalot, 1986-1991) et de monographies récentes issues des séries *Diatoms of Europe* et *Iconographia Diatomologica* (A.R.G. Gantner Verlag et Koeltz Scientific Books).

Les résultats des inventaires exprimés en effectifs comptés et abondances relatives ont été soumis à divers calculs d'indices disponibles dans le logiciel OMNIDIA v.4 (Lecointe et al., 1993). Une attention a également été portée à l'évolution de la biodiversité (calcul de la diversité spécifique (indice de Shannon, 1963) le long du gradient. Des compléments d'information ont également été obtenus à partir de l'examen des caractéristiques écologiques dominantes (notamment préférences en termes de courant) extraites des classifications de Denys (1991).

Enfin certains "traits biologiques" susceptibles de traduire d'éventuels effets toxiques ont été évalués. Il s'agit de la distribution des biovolumes moyens calculés par relevé, pondérés par l'abondance des taxons. Ces volumes spécifiques ont été calculés à partir des dimensions moyennes relevées dans les flores en appliquant les formules proposées par Wetzel et Likens (1991), et Hillebrand et al. (1999).

L'abondance de formes anormales recensées lors des comptages a également été notée. Ces déformations qui affectent indifféremment le contour valvaire, la striation ou l'ensemble des valves sont généralement attribuées à des effets toxiques (herbicides ou métaux lourds), mais peuvent également être dues à d'autres stress environnementaux (Falasco et al., 2009).

III - Résultats intermédiaires / éléments de discussion

III - 1. Approche géomorphologique

III - 1.1. Faciès et classes de vitesse

Un linéaire de 2014 m et 224 structures ont été décrits pour une surface totale de 9259 m². Les proportions des tracés restauré et non-restauré y sont respectivement de 55,6% et 44,4% en surface, et 69,7% et 33,3% en linéaire.

Après reconstitution des structures continues, le bilan s'établit à 78 unités décrites réparties comme suit en fonction des secteurs (Tableau 7).

Tableau 7 - Bilan quantitatif des types de faciès rencontrés dans les secteurs restauré et non-restauré.

	longueur (m)		surface (m ²)	
	non restauré	restauré	non restauré	restauré
radier	31	146	181	450
plat	115	908	699	3483
mouille	465	349	3229	1217
Total	611	1403	4109	5151

Exprimées en pourcentage, on peut constater que dans le type restauré, les faciès radier ont leur proportion plus que doublée en surface, et que les proportions dominantes des faciès plat et mouille ont été inversées (Tableau 8).

Tableau 8 - Proportion des types de faciès rencontrés dans les secteurs restauré et non-restauré.

	Longueur (%)		Surface (%)	
	non restauré	restauré	non restauré	restauré
radier	5	10	4	9
Plat	19	65	17	68
mouille	76	25	79	24

On a de ce point de vue une redynamisation du secteur lotique, avec une modification des vitesses de courant (Figure 5) qui devrait retentir sur les assemblages biologiques.

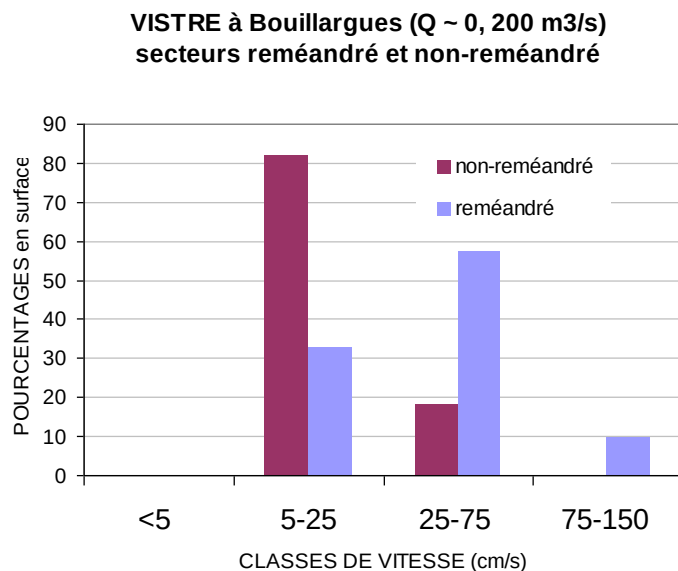


Figure 5 - Proportion des classes de vitesses moyennes présentes dans les deux types de secteurs pour un débit de 0,2 m³/s.

Sur le plan granulométrique (Figure 6), la différence entre les deux types de secteurs se résume sur trois aspects : une grande proportion de « roche mère » et moins de granulométrie la plus grossière dans le secteur restauré, et une proportion de vase nettement plus forte dans le secteur non-restauré, qui masque probablement la « roche-mère » sous-jacente.

L'habitabilité pondérée par la surface des types granulométriques dominants est de 3,8 pour le secteur restauré et de 5,4 pour le secteur non-restauré, soit environ respectivement 55% et 77% du potentiel maximal de 7 représenté par les Pierres-Galets.

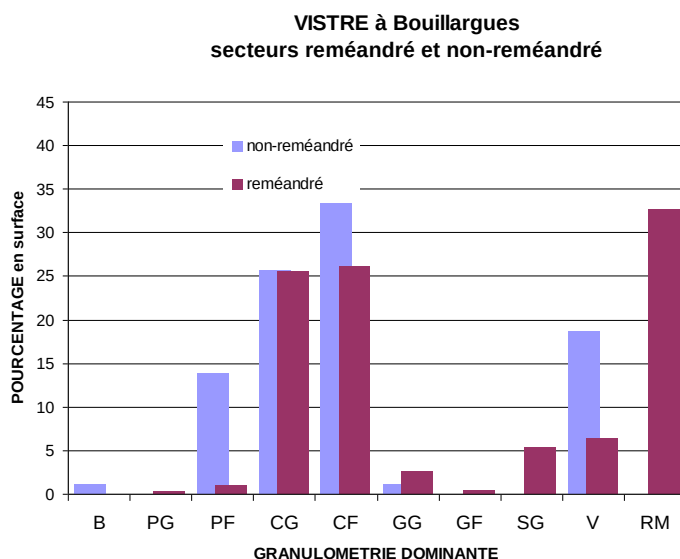


Figure 6 - Proportions des types granulométriques dominants dans chacun des secteurs.

Les différences d'habitabilité sont portées essentiellement par les faciès « plat » et « mouille » du secteur restauré où de forts pourcentages de « roche-mère » ont été observés. Près de 30% de la surface du faciès « plat » sont ainsi dépourvues de cailloux grossiers (Figure 7).

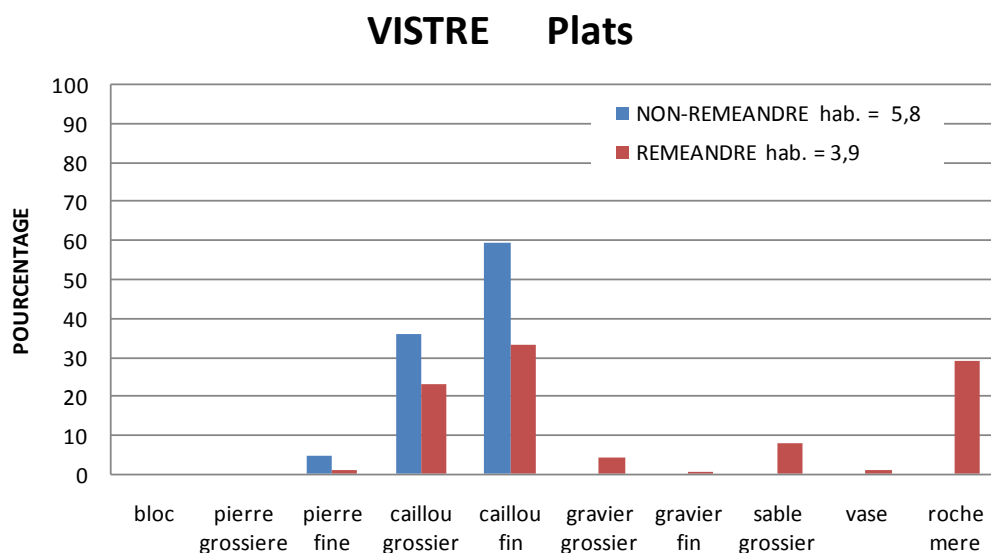


Figure 7 - Proportions de la granulométrie dominante dans le faciès « plat » dans chacun des secteurs.

Alors que plus de 50% de la surface du faciès « mouille » est nue (Figure 8).

VISTRE Mouilles

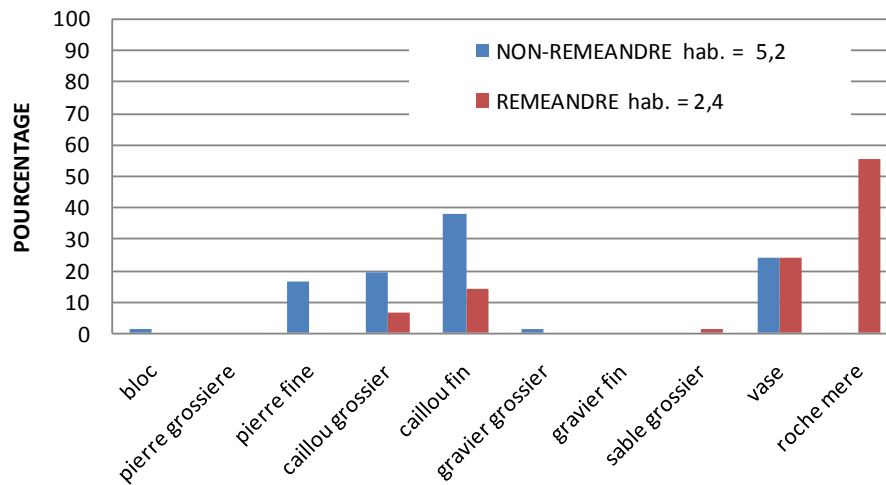


Figure 8 - Proportions de la granulométrie dominante dans le faciès « mouille » dans chacun des secteurs.

III - 1.2. Régime thermique

Sur la période d'enregistrement (Avril à Octobre) les températures moyennes révèlent que ce secteur du Vistre fait partie des cours d'eau à fort échauffement estival, avec une moyenne voisine de 18°C. De l'amont vers l'aval, les moyennes sont très proches, mais une petite différence semble se manifester au niveau de la station 3, Vistre amont Bois2.

Thermo 1	Vistre amont	17,8
Thermo 2	Vistre aval Bois1	18,2
Thermo 3	Vistre amont Bois2	18,0
Thermo 4	Vistre aval	18,3

En été, les températures enregistrées ont dépassé pendant quelques jours les 26°C, dans trois sites sur quatre, pendant une courte période fin juillet - début août 2008.

La Figure 9 suivante illustre les positions relatives des maxima sur chacun des sites. Les différences sont faibles mais elles témoignent que nous ne sommes pas en présence d'un gradient d'échauffement continu dans le linéaire étudié.

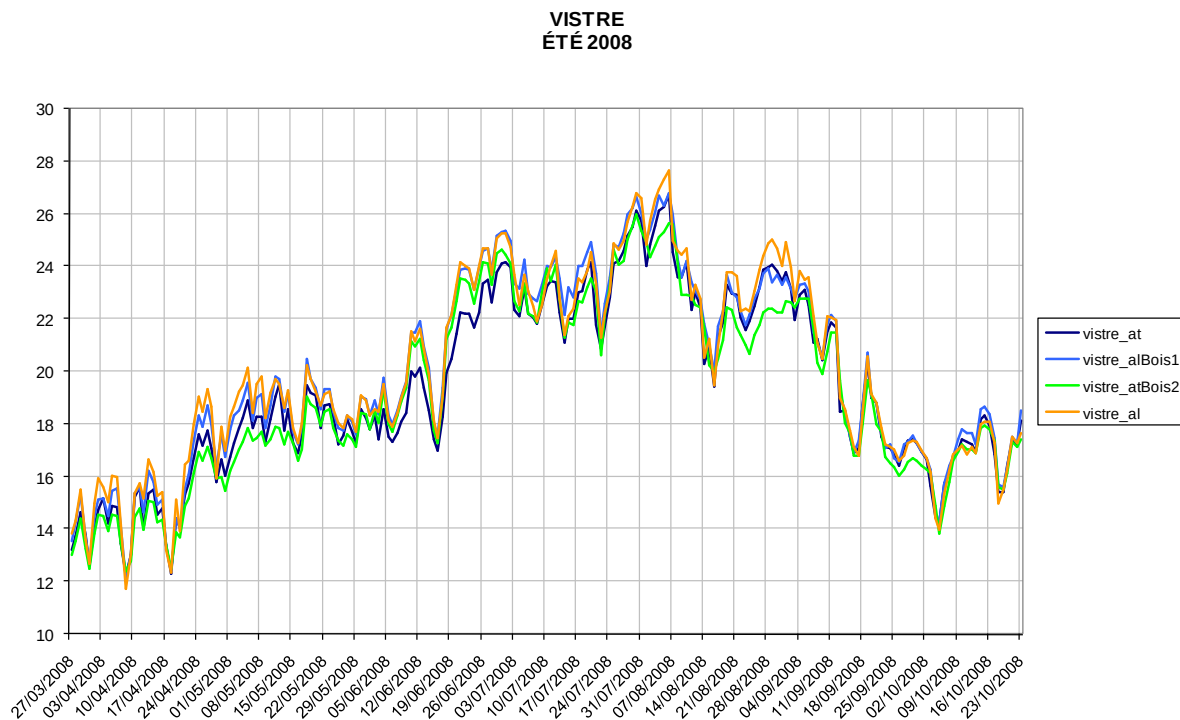


Figure 9 - Valeurs maximales quotidiennes dans quatre stations du site de Bouillargues

La station la plus en aval est souvent la plus chaude dans la chronique, mais la station Vistre « amont Bois2 » semble manifester une résistance à l'échauffement. Cette particularité se retrouve dans les caractéristiques des écarts quotidiens, où l'on peut remarquer qu'ils s'amplifient dès lors que le débit s'affaiblit (cf. Figure 10, débits journaliers des mois de mai et juin à la station de Bernis).

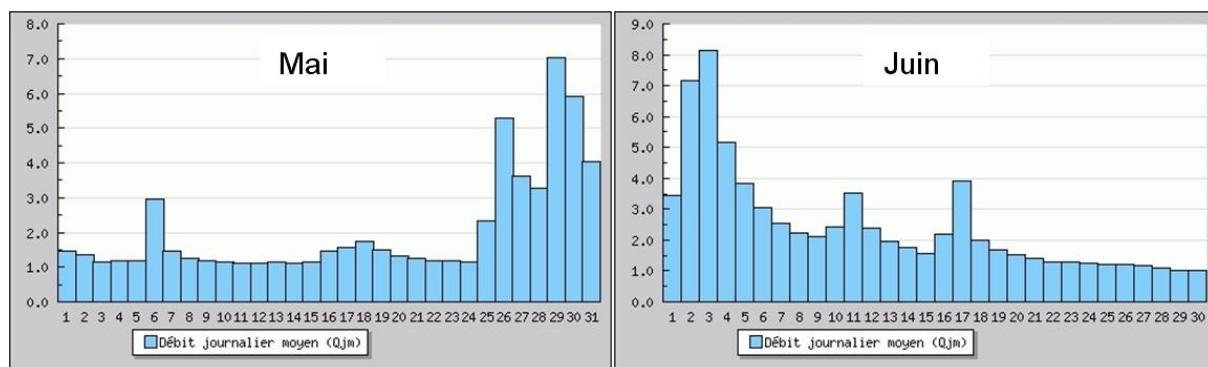


Figure 10 - Débits moyens journaliers du Vistre à Bernis (source Banque Hydro).

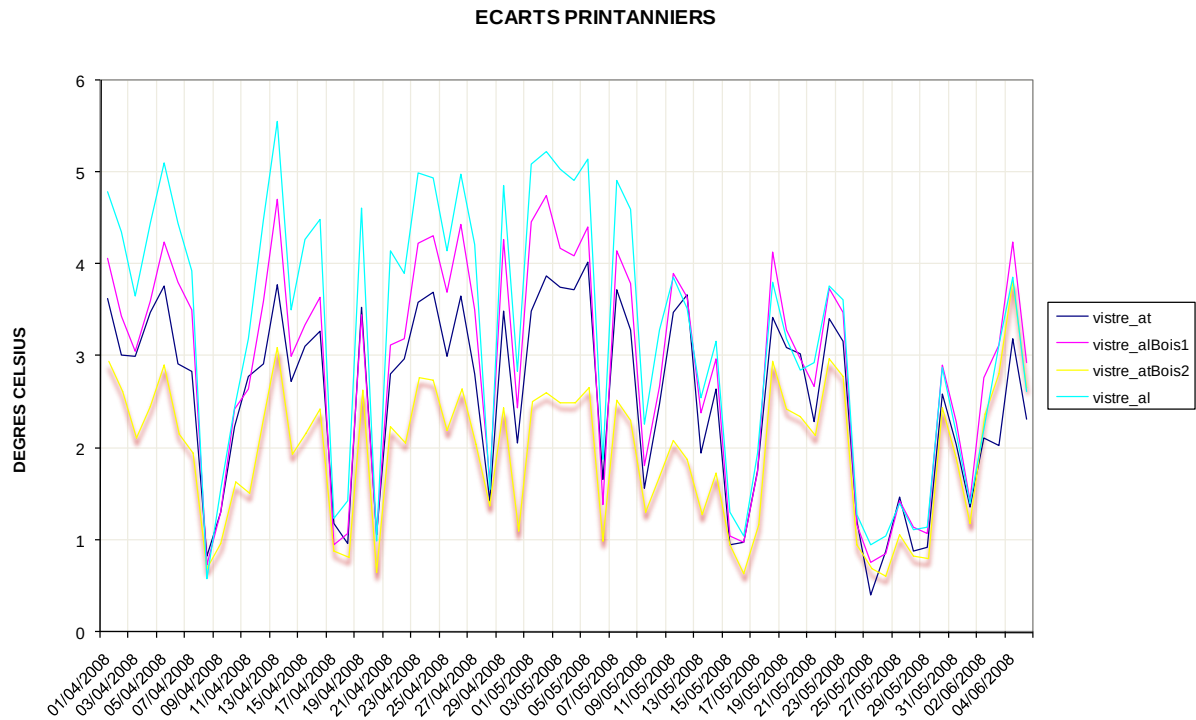


Figure 11 - Écarts journaliers aux quatre stations en phase printanière.

Dans la Figure 11 sont illustrés les écarts printaniers entre le 1^{er} avril et 5 juin. L'homogénéisation des écarts entre les stations en fin d'épisode correspond à une période pluvieuse (25 mai au 3 juin). Il semble donc dans la station 3 « Vistre amont Bois2 » qu'il y ait une relation plus forte avec une masse d'eau moins sujette à l'échauffement aérien (apport rivulaire ou nappe alluviale ?).

Bien que ces différences soient minimales, elles pourraient avoir un effet biologique sur la faune benthique dans un regain de qualité, car cette zone est associée pour partie en amont à la plus grande densité de radiers des secteurs étudiés (Figure 12).

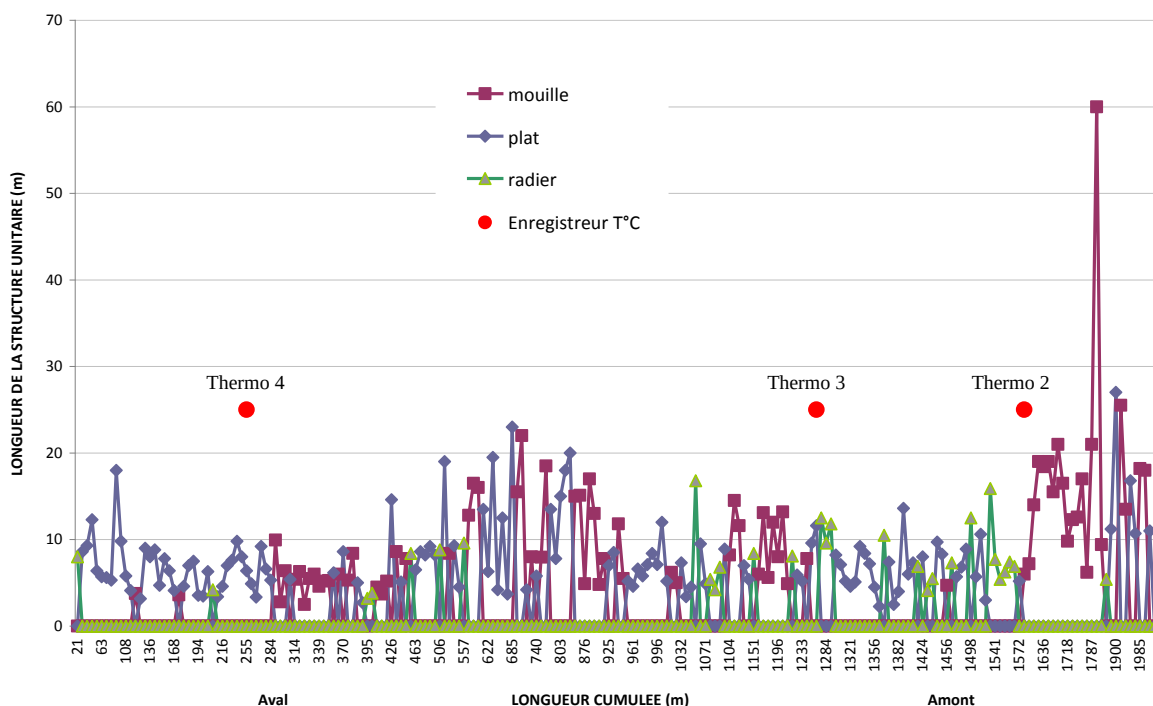


Figure 12 - Positions et longueurs des différents faciès le long du secteur étudié (points rouges : position des enregistreurs de température. NB : l'enregistreur N°1, « Vistre_amont » est en amont du secteur décrit).

III - 2. Caractérisation chimique

Seuls les éléments nutritifs ont été analysés sur le site de Bouillargues. 7 campagnes ont été prises en considération.

L'annexe 4 récapitule les valeurs de ces 7 campagnes (septembre 08, février 09, avril 09, juillet 09, septembre 09, novembre 09 et avril 2010) en repositionnant les classes de qualité du SEQ Eau.

III - 2.1. Classes de qualité

Comme montré par les analyses et les rapports d'étude précédents, le Vistre est de très mauvaise qualité chimique (Annexe 4). Les éléments déclassants sont systématiquement nitrates, phosphore total et phosphate, avec des concentrations parfois très élevées (jusqu'à 4,6 mg/L en PO_4). Toutes ces concentrations sont à mettre en regard avec les proliférations végétales.

Un élément marquant est la stabilité de la qualité chimique de l'eau, de l'amont du site (HB9) jusqu'à l'amont du rejet de la station d'épuration (HB2), quelle que soit la saison. Il est à noter que le rejet de la petite station d'épuration dégrade un peu plus le milieu (aluminium et phosphore et phosphates). Les concentrations en ammonium du Vistre sont en moyenne multipliées par 44 dans le rejet et celles du phosphore par 6,5. Néanmoins, l'impact du rejet sur le Vistre au niveau de la station HB1 concerne principalement l'ammonium : il passe d'une classe de qualité 'très bonne' en amont du rejet à une classe de qualité globalement 'moyenne' en aval. Les concentrations en phosphore total et en orthophosphates provenant de la STEP n'ont pas un impact aussi fort puisque ces deux paramètres présentent déjà des valeurs critiques avec des classes de qualité 'moyenne' ou 'mauvaise' en amont de la STEP.

III - 2.2. Variabilité spatio-temporelle

Les deux premiers axes factoriels de l'ACP permettent d'extraire respectivement 51 et 27% de la variance totale du tableau analysé (Figure 13a). Le plan factoriel étudié est celui délimité par les axes F1 et F2 (Figure 13b et c).

L'axe F1 est corrélé avec les orthophosphates (-51,10%), les chlorures (-46,36%), les nitrates (47,85%) et l'oxygène dissous (43,81%). Les nitrites sont plus particulièrement corrélés avec l'axe F2 (-67,79%).

La répartition des relevés sur le plan factoriel se fait suivant un gradient saisonnier : (i) les relevés de septembre et juillet se situent dans la partie négative de l'axe F1 et (ii) les relevés de novembre et avril se situent dans la partie positive de l'axe F1 (exceptée le relevé de novembre 2009 de la station HB1). On note également une plus forte dispersion des points en été et en automne. Les relevés de la station 1 se situent alors dans le quart négatif des axes F1 et F2, associés à de plus fortes concentrations en ammonium, nitrites et orthophosphates. Au contraire, en novembre et avril, période de hautes eaux, les relevés sont beaucoup plus groupés et corrélés avec de plus forts taux d'oxygène dissous et de nitrates.

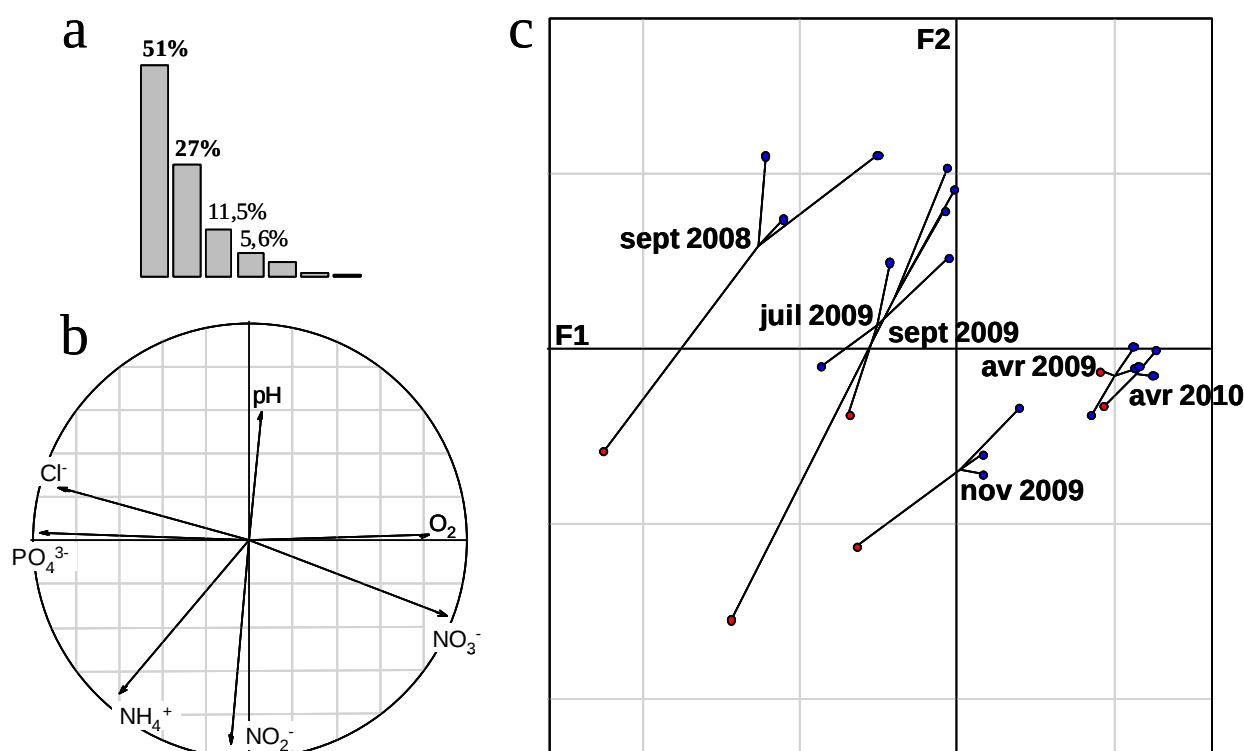


Figure 13 - ACP du tableau des analyses chimiques (24 relevés x 7 paramètres) : a) histogramme des valeurs propres ; b) projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 ; c) projection des relevés avec regroupement des relevés par date de prélèvement. Bleu : prélèvements réalisés sur les stations 2, 5 et 9, situées en amont du rejet de la STEP ; Rouge : prélèvements réalisés sur la station 1, située en aval du rejet de la STEP.

La caractérisation chimique ne permet pas de mettre en évidence des disparités spatiales nettes sur le tronçon étudié, en revanche, elle met en évidence sa mauvaise qualité. La principale source de contamination provient des matières

phosphorées. Par ailleurs, le rejet de la STEP présente fortes concentrations en ammonium par rapport à celles du Vistre lui-même.

Sur le tronçon étudié, la physico-chimie n'est donc pas un facteur de variation majeur des conditions abiotiques entre les stations.

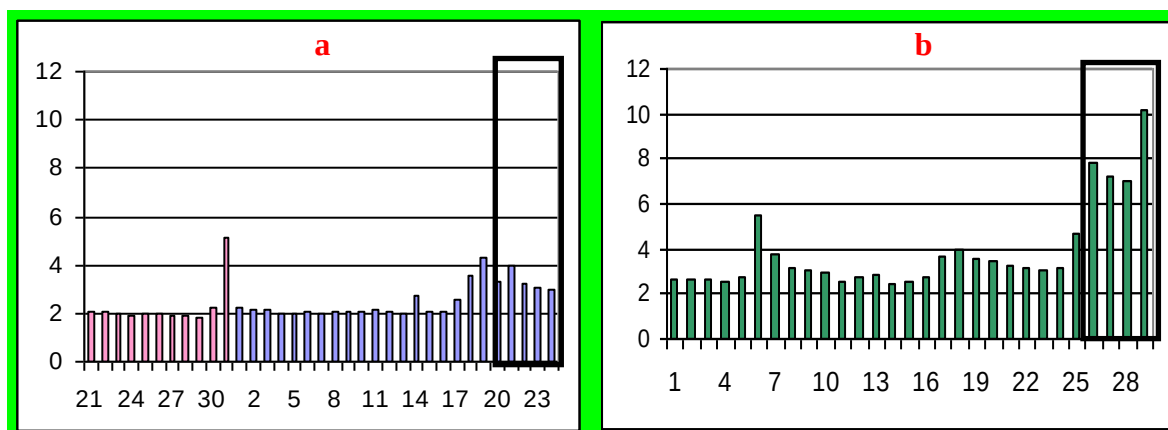
III - 3. Macrophytes

III - 3.1. Évolution des débits

L'évolution des débits a été prise en compte au Cailar trente jours avant la date de début de chacune des campagnes (Figure 14).

En mars comme en avril 2008, les débits étaient relativement faibles, de l'ordre de 2 m³/s sauf le 31 où le débit dépasse 5 m³/s. Ils ont ensuite significativement augmenté à partir du 18 avril jusqu'au 21 pour diminuer par la suite jusqu'à la fin du mois. Le débit moyen au mois d'avril est de 2,61 m³/s. Nous avons effectué la première campagne du 21 au 24 avril. Le débit pour cette période variait entre 3 et 4 m³/s. Les conditions climatiques étaient clémentes et la turbidité faible. Cependant, lors de la première campagne, la zone 34 ainsi que les points HB 8 et 9 n'ont pas été étudiés car la profondeur était trop importante.

En mai 2008, les débits ont été très bas jusqu'au 24 -25 mai. On remarque une augmentation très importante des débits à partir du 26 mai et jusqu'à la fin du mois. Le débit moyen du mois de mai est de 4,15 m³/s. Le débit maximum instantané, atteint le 29/05/2008, est de 12,80 m³/s. Cette augmentation exceptionnelle est due aux conditions météorologiques de la période : beaucoup d'orages et une pluviométrie importante.



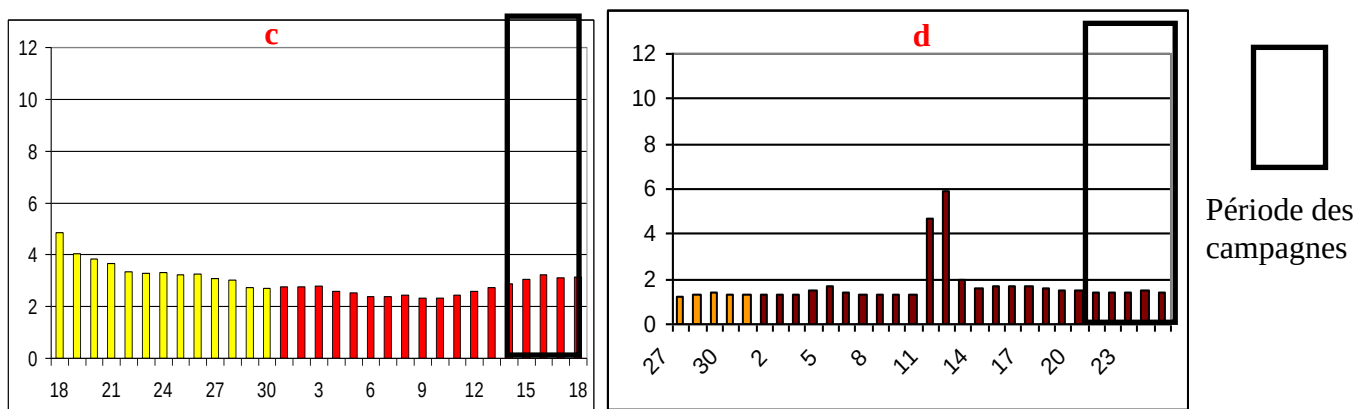


Figure 14 - Débits journaliers moyens (m^3/s) en 2008 mars (rose)-avril (bleu) (a), mai (b), juin (jaune)-juillet (rouge) (c) août (orange)-septembre (marron) (d)

Nous avons effectué la deuxième campagne du 26 au 29 mai. Les débits, ainsi que les hauteurs d'eau et les vitesses, étaient très élevés. La grande quantité de matière en suspension et la pluie n'ont pas permis d'avoir une visibilité suffisante pour les observations. Lors de cette deuxième campagne, on peut considérer que les conditions et leur historique étaient défavorables à une bonne représentativité des relevés de végétation aquatique. Le relevé général n'a donc pas pu être fait.

Les débits de fin juin ont diminué passant de $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ le 18 juin à $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ le 30 juin. En juillet les débits ont peu varié et sont restés faibles. Le débit moyen du mois de juillet est de $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit maximum instantané de $3,34 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces deux valeurs ont été atteintes le 16/07/2008. La troisième campagne a été menée du 15 au 18 juillet. Les conditions de cette période étaient favorables, et la transparence de l'eau était satisfaisante pour les observations. Le relevé de la zone 34 a été réalisé à l'aide d'une barque (mise à disposition par l'équipe verte du Syndicat), tous les points HB ont pu être relevés.

La quatrième campagne a été effectuée du 22 au 25 septembre 2008. Lors de cette période les débits étaient très bas (inférieurs à $2 \text{ m}^3/\text{s}$). Les conditions étant favorables, toutes les zones et tous les points HB ont pu être analysés.

Rappelons que les débits sur la zone d'étude sont bien inférieurs à ceux utilisés comme référence hydrologique ici (station du Cailar), puisqu'ils étaient, d'après nos estimations, de l'ordre de 100 à 150 l/s lors des campagnes d'avril et de juillet et moins élevés en septembre.

III - 3.2. Facteurs environnementaux

Parmi la multitude de facteurs qui déterminent la nature, l'architecture et la répartition des communautés de macrophytes, quelques paramètres ont une influence prépondérante, dont le substrat, la vitesse de courant et l'occupation végétale des berges

Substrats et vitesses de courant : La granulométrie apporte une information importante tant pour les aspects morphodynamiques (rugosité du lit, transport solide) que biologiques (notion d'habitat, de refuge et d'abri hydraulique). Pour différencier les différents types de substrat, l'échelle granulométrique de Wentworth (1922) modifiée dans Malavoi et Souchon (1989) a été utilisée (Tableau 9).

Tableau 9 - Classification granulométrique (Malavoi, Souchon, 1989)

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
Rochers	> 1024	R
Blocs	256-1024	B
Pierres Grossières	128-256	PG
Pierres Fines	64-128	PF
Cailloux Grossiers	32-64	CG
Cailloux Fins	16-32	CF
Graviers Grossiers	8-16	GG
Graviers Fins	2-8	GF
Sables Grossiers	0,5-2	SG
Sables Fins	0,0625-0,5	SF
Limons	0,0039-0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A

La Figure 15 présente les proportions de chaque type de substrat de l'amont vers l'aval.

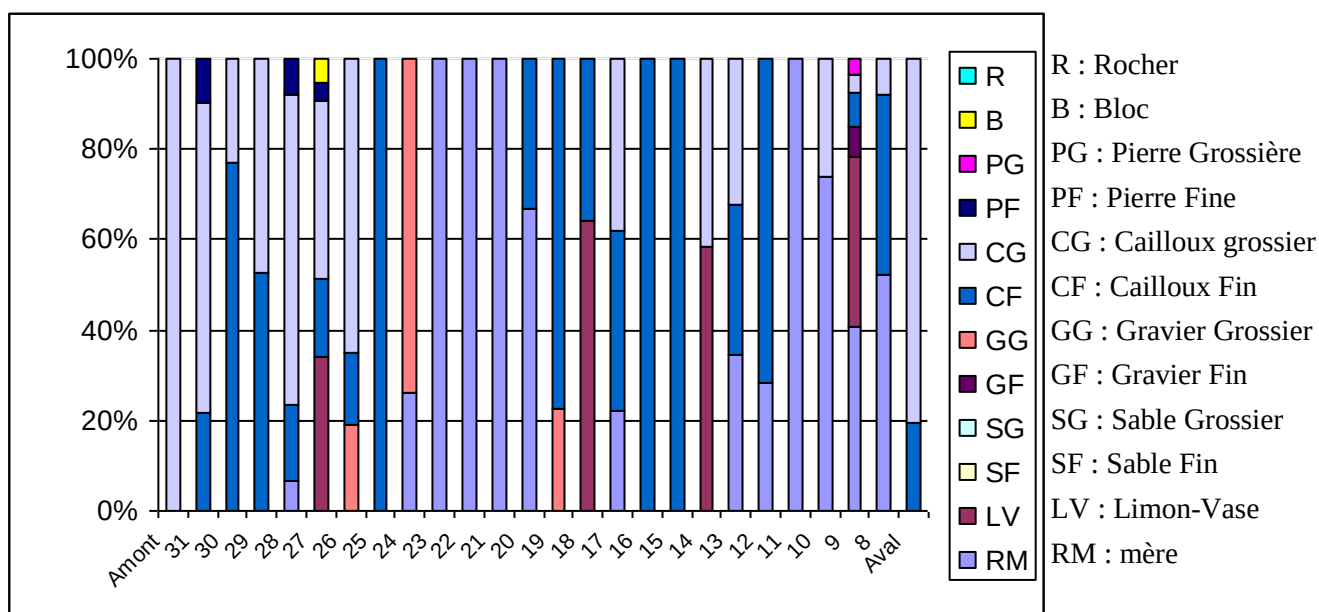


Figure 15 - Caractérisation des types de substrats par site.

La nature du substrat varie fortement le long du profil. Pour faciliter la comparaison ultérieure avec les autres paramètres, des regroupements tenant compte des substrats dominants ont été établis (Figure 16). Il s'agit de **Mélange Cailloux ; Roche mère ; Cailloux + Roche mère ; Limon + Roche mère ; Limon + Cailloux**. Sur le site étudié, la roche mère est constituée par de la marne.

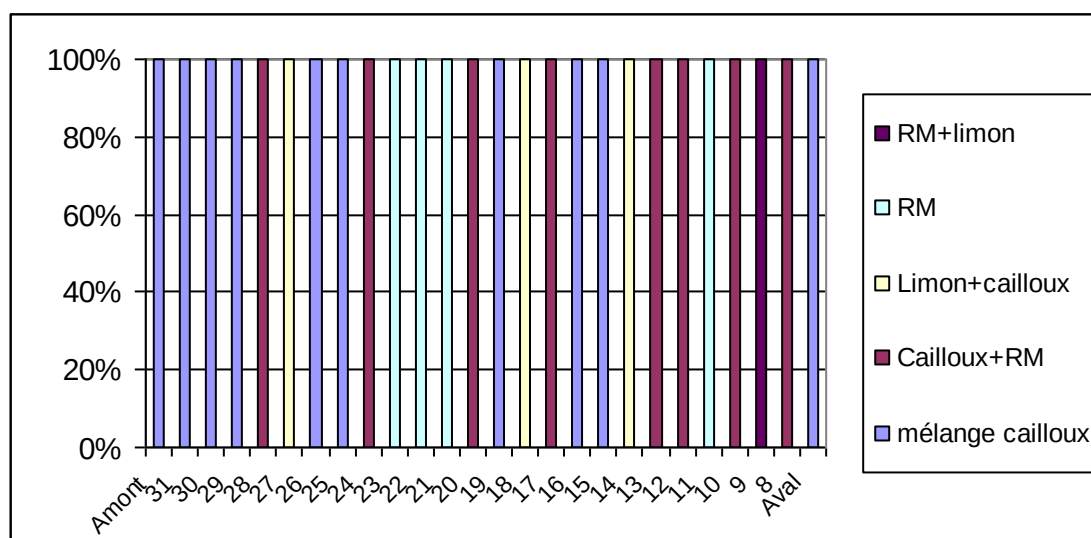


Figure 16 - Caractérisation des zones par classe de substrat

Les zones 32, 31, 30, 29, 26, 25, 19, 16, 15 et 7 ont des substrats constitué majoritairement de cailloux seuls, les zones 28, 24, 20, 17, 13, 12, 11 et 8 de mélange marne-cailloux, et les zones 27, 18 et 14 d'un mélange limon-cailloux. Les zones 21 à 23 présentent des substrats constitués de roche mère.

Différentes classes de vitesses de courant caractérisent les différentes zones étudiées (Figure 17). Les trois classes sont les suivantes :

- 1 : de 5 à 25 cm/s :
- 2 : de 25 à 75 cm/s
- 3 : de 75 à 150 cm/s :

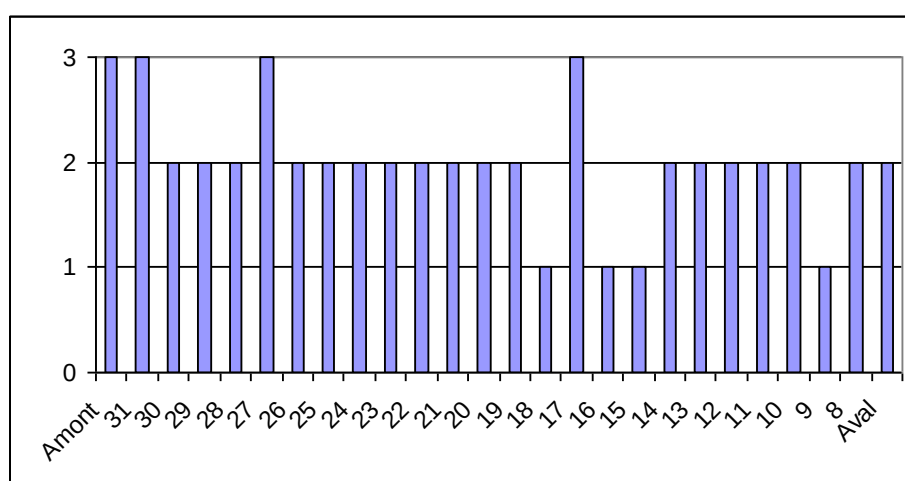


Figure 17 - Évolution de la vitesse le long du tronçon (cm/s)

La vitesse de courant varie de manière importante sur l'ensemble du tronçon. La classe de vitesse la plus souvent retrouvée est 25 à 75 cm/s (classe 2). La classe 1, la plus lente, regroupe les zones : 18, 15, 16 et 9. La classe 2, correspondant à une vitesse moyenne, regroupe les zones : 30, 29, 28, 26, 25, 24, 23, 22, 21, 20, 19, 14, 13, 12, 11,

10, 8 et 7. Enfin la classe 3, correspondant à une vitesse d'écoulement rapide, regroupe les zones : 32, 31, 27 et 17.

De manière générale, on remarque que les vitesses les plus faibles se retrouvent plutôt vers l'aval. A l'amont, les vitesses les plus importantes ont été observées dans les zones 32 et 31.

Occupation végétale des berges :

De façon générale, l'occupation des berges est plus importante en amont qu'en aval c'est-à-dire que la végétation rivulaire est plus développée en amont qu'en aval (Figure 18). Les zones de forêt, 34, 33 et 28 sont bien visibles sur cette figure.

Cette méthode ne fournit pas une évaluation directe de l'ombrage effectif sur le lit de la rivière, qui inclut le déversement de la végétation rivulaire, mais une description de l'environnement des rives de chaque zone. Les deux paramètres sont toutefois liés puisque l'observation a montré que les ombrages les plus importants se trouvent sur les secteurs fortement occupés par la catégorie "grands arbustes" (haies de saule déversants) et "grands arbres" (secteurs forestiers).

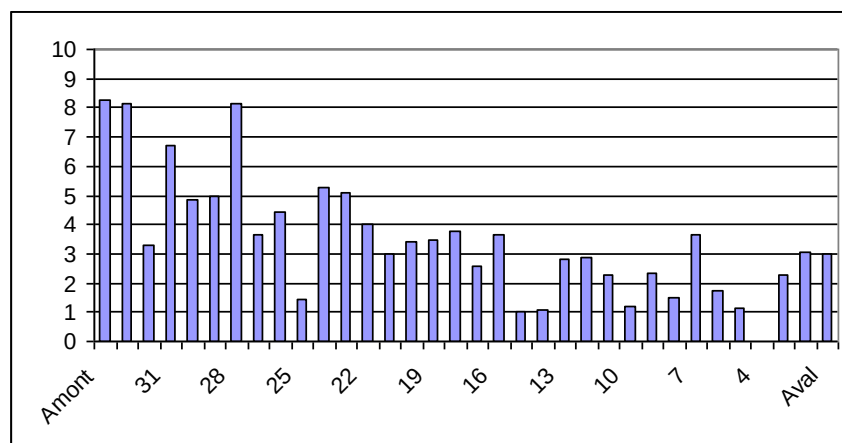


Figure 18 - Indice d'occupation des berges des différentes zones de l'amont vers l'aval

III - 3.3. Analyse générale de la végétation aquatique

Répartition des macrophytes sur le profil longitudinal : Les principales espèces observées sur l'ensemble des campagnes de terrain sont *Potamogeton pectinatus* (Pot.pec), *Potamogeton crispus* (Pot.cri); *Myriophyllum spicatum* (Myr.spi), *Ludwigia peploides* (Lud.pep), ***Veronica anagallis-aquatica*** (Ver.ana), *Vaucheria sp.* (Vau.spx), *Apium nodiflorum* (Api.nod), *Carex sp.*, *Cladophora sp* (Cla.spx), *Polygonum hydropiper* (Pol.hyd) et *Lemna minuta* (Lem.min). La liste complète des macrophytes des trois campagnes est présentée en annexe.

Les recouvrements des principales espèces observées lors de la campagne d'avril sont présentés dans la Figure 19. Il s'agit de *Potamogeton pectinatus* (Pot.pec), *Potamogeton crispus* (Pot.cri); *Myriophyllum spicatum* (Myr.spi), *Ludwigia peploides* (Lud.pep.), *Veronica anagallis-aquatica* (Ver.ana), *Vaucheria* (Vau.spx), *Apium nodiflorum* (Api.nod) et *Carex sp.*

La répartition des macrophytes sur le site est très variable selon les zones mais d'une manière générale, les pourcentages de recouvrement augmentent vers

l'aval. Le recouvrement par le myriophylle en épi (*M. spicatum*) est important en amont, dans la zone 33, non restaurée et semi éclairée (40 %). Des zones 32 à 24, les pourcentages de recouvrement deviennent très faibles. Ils augmentent vers l'aval à partir de la zone 23 jusqu'à 60 %, pour atteindre plus de 70 % dans la zone 3.

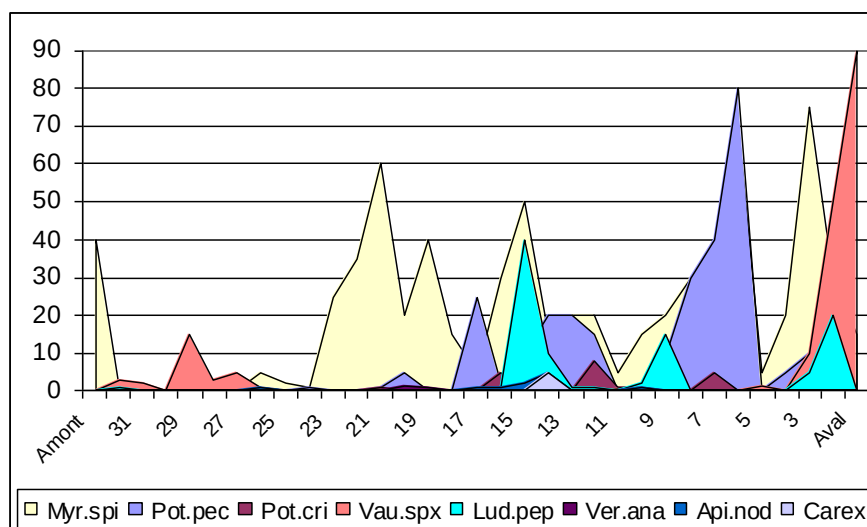


Figure 19 - Pourcentages de recouvrement par zone des principaux macrophytes (campagne d'avril)

Le potamot pectiné (*P. pectinatus*) apparaît de manière significative à partir de la zone 17 (25 %). Le recouvrement par cette espèce atteint un maximum de 80 % dans la zone 6. Les vauchéries (macro-algues) sont surtout présentes à l'aval avec une valeur maximale de 90 % de recouvrement dans la zone 1. La jussie (*L. peploides*) est présente dans les zones 15, 9 et 2 avec une valeur de recouvrement proche de 40 % dans la zone 15. Le potamot crépu (*P. crispus*), la véronique (*V. anagallis-aquatica*), le carex (*Carex* sp) et l'ache (*A. nodiflorum*) ne sont présents qu'en faibles quantités.



Photo 3 : *Myriophyllum spicatum* (à gauche) et *Potamogeton pectinatus* (à droite)

La Figure 20 présente les pourcentages de recouvrement par zone des principaux macrophytes sur le tronçon pour les campagnes de juillet et de septembre.

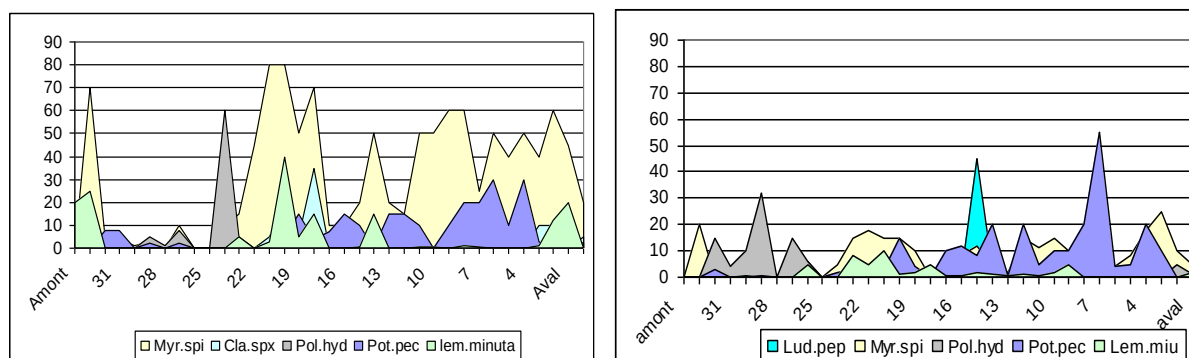


Figure 20 - Pourcentages de recouvrement par zone des principaux macrophytes lors des campagnes de juillet (à gauche) et septembre (à droite).

Les espèces dominantes observées lors de ces deux campagnes sont *Myriophyllum spicatum*, *Cladophora sp.*, *Polygonum hydropiper*, *Potamogeton pectinatus* et *Lemna minuta*. L'allure générale des profils de recouvrement des trois campagnes est assez constante: les pourcentages cumulés sont plus faibles à l'amont qu'à l'aval.

Les variations de recouvrement du myriophylle sont relativement similaires entre les différentes campagnes. La zone 33, en amont du tronçon étudié, présente des recouvrements importants lors des trois campagnes.

Les espèces qui n'ont pas été observées ou qui ont fortement régressé lors de la dernière campagne sont :

- *Ludwigia peploides* : les jussies ont fait l'objet d'un arrachage manuel (travail réalisé par l'équipe verte du SMBVV),
- *Vaucheria sp.* : les vauchéries ne font plus partie des espèces dominantes car elles régressent quand la température s'élève.
- *Potamogeton crispus*, *Veronica anagallis-aquatica*, *Apium nodiflorum* et *Carex sp.* sont toujours présentes sur le tronçon mais leur pourcentage de recouvrement est devenu très faible.

Par contre, il faut noter l'apparition des lentilles d'eau (*Lemna minuta*), et des cladophores (*Cladophora sp.*). La renouée poivre d'eau (*Polygonum hydropiper*) déjà présente à la première campagne sous forme hydrophyte, c'est-à-dire immergée, se retrouve sous forme héliophyte lors de la troisième campagne. Elle présente un recouvrement maximum de 60 % dans la zone 25.

Les deux espèces dominantes dans le secteur étudié, quelle que soit la campagne, sont le potamot pectiné (*Potamogeton pectinatus*) et le myriophylle en épis (*Myriophyllum spicatum*).

Pourcentages de recouvrement et diversité taxonomique : Seules les campagnes 1 (avril), 3 (juillet) et 4 (septembre) sont considérées dans l'analyse, celle de mai n'ayant pas pu être réalisée dans des conditions hydrologiques suffisamment favorables. La comparaison des trois campagnes peut être faite en observant les

évolutions des pourcentages de recouvrement cumulés (Figure 21) et de l'indice de diversité de Shannon (Figure 22).

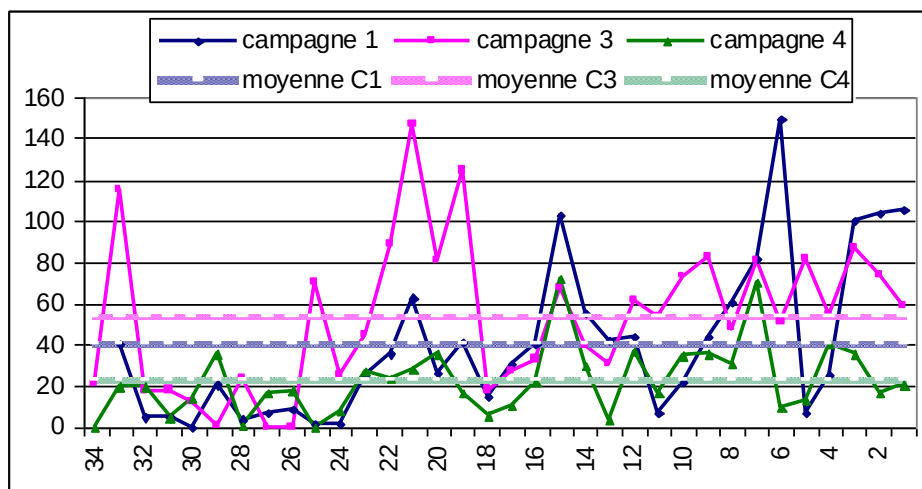


Figure 21 - Pourcentages de recouvrement cumulés par zone des campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).

La valeur moyenne de ce pourcentage de recouvrement cumulé est plus élevée pour la troisième campagne (53,25 %) que pour la première campagne (40 %) et la quatrième campagne (22,8 %). Ces différences d'occupation des biotopes par les macrophytes sont à mettre en relation avec le cycle saisonnier de la végétation, plus développé en milieu d'été.

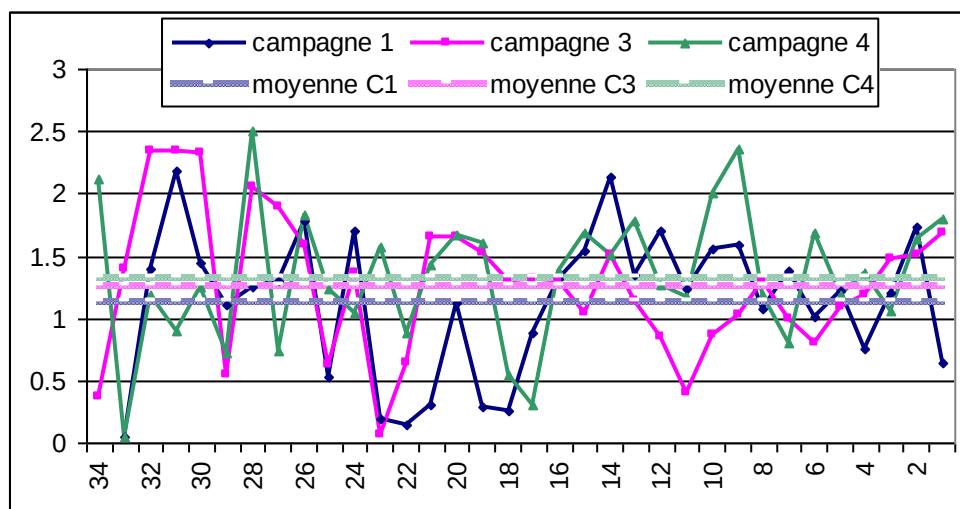


Figure 22 - Indices de diversité de Shannon par zone des campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).

La diversité calculée à l'aide de cet indice est plus importante lors des campagnes de juillet et septembre. La première campagne a eu lieu au printemps (en avril) alors que la troisième et la quatrième campagne se sont déroulées en été (juillet et septembre) ; dans les conditions hydrologiques de 2008, le mois de juillet était celui qui correspondait le mieux à un développement optimal des végétaux en termes de pourcentages de recouvrement cumulés et d'indice de diversité. Le nombre moyen

d'espèces à l'échelle du tronçon étudié est quasiment identique quelle que soit la campagne (Figure 23).

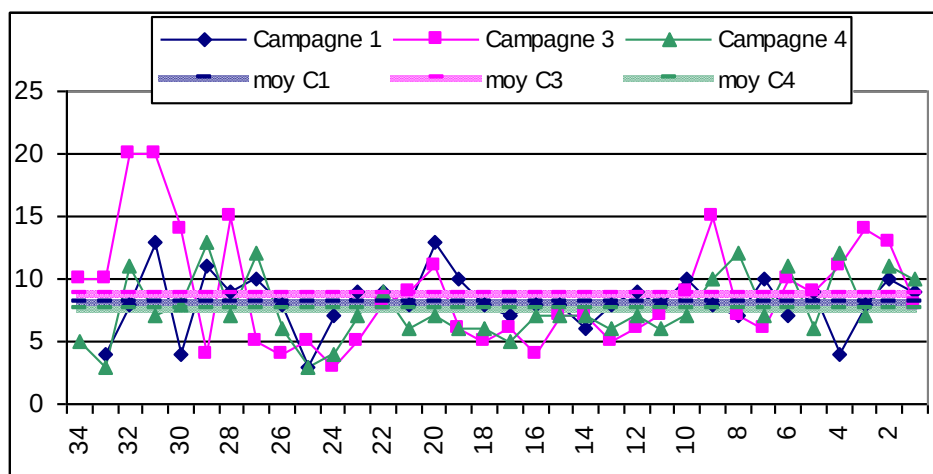


Figure 23 - Nombre d'espèces des zones pour les 3 campagnes d'avril (C1), juillet (C3) et septembre (C4).

Évolution saisonnière des macrophytes : Afin d'évaluer l'évolution saisonnière des macrophytes, les pourcentages de variation des recouvrements cumulés ont été calculés pour les stations HB (hydrobiologie), d'une part entre les campagnes d'avril et de juillet, d'autre part entre les campagnes de juillet et de septembre (Figure 24).

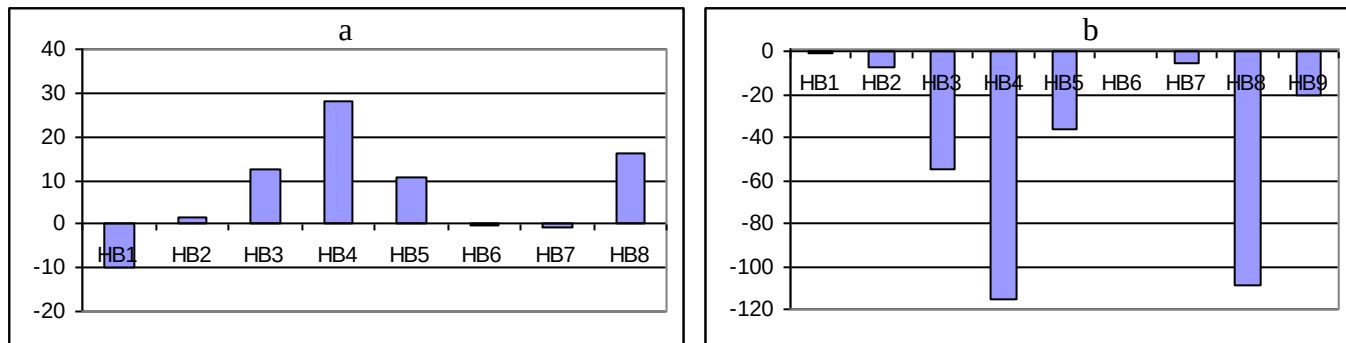


Figure 24 - Pourcentages de variation des recouvrements cumulés sur les stations HB entre avril et juillet (a) et entre juillet et septembre (b)

Les stations HB qui présentent les plus fortes augmentations de recouvrement d'avril à juillet sont également celles qui présentent les plus fortes régressions de juillet à septembre. Ces stations HB2, HB3, HB4, et HB5 se trouvent dans les zones restaurées. Ces résultats montrent donc une évolution saisonnière classique des végétaux aquatiques, avec un développement qui peut s'étendre sur l'ensemble de la période végétative et une sénescence qui peut être très rapide après l'optimum biologique.

Le pourcentage de recouvrement de la station HB6 ne montre aucune variation saisonnière notable mais les recouvrements végétaux de cette station non restaurée présentant un très fort ombrage sont toujours restés très faibles.

III - 4. Invertébrés

III - 4.1. Approche taxonomique

Analyse factorielle des correspondances (AFC)

La distribution spatio-temporelle des taxons rencontrés sur le tronçon étudié est représenté figure 25. Le plan factoriel F1xF3 représente 24,2% de l'inertie du tableau faunistique. Le choix de ce plan par rapport au traditionnel F1xF2 repose sur une meilleure discrimination des relevés pour une très faible perte de l'information (-1,3%) par rapport au plan F1xF2. La position des relevés dans ce plan factoriel est représentée par groupe de station (Figure 25a) et par saison (Figure 25b). De plus, afin de rendre plus lisible le plan factoriel représentant les taxons, leurs positions dans ce même plan ont été regroupées en fonction de leur appartenance systématique (Figure 25c).

- Le plan factoriel F1xF3 permet de distinguer 3 groupes de stations :
- les relevés des stations HB8 et HB9 (non restaurées) situés dans le quart supérieur gauche du plan factoriel
- les relevés des stations HB5 et HB7 (ayant reçu un apport de substrat) dans le quart supérieur droit du plan factoriel
- les relevés des stations HB1 à HB4 (restaurées) et HB6 (non restaurée) formant un groupe compact dans le quart inférieur droit du plan factoriel.

L'axe F1 qui est le plus structurant, semble donc correspondre à un gradient physique (stations restaurées dans sa partie positive vs stations non restaurées dans sa partie négative), avec une exception, la station HB6, non restaurée, située dans la partie positive de l'axe F1.

Nous pouvons également mettre en évidence une séparation des relevés d'automne par rapport aux autres relevés de l'année, les premiers se situant principalement dans la partie négative de l'axe F1. Les autres relevés sont concentrés dans le quart positif des deux axes.

D'un point de vu taxonomique, nous observons une faune très homogène sur la totalité du tronçon ; en effet, la majorité des taxons occupent une place centrale dans le plan factoriel, ce qui montre qu'ils sont communs à toutes les stations. C'est notamment le cas des Diptères, Mollusques, Crustacés et Oligochètes.

Néanmoins, les stations amont non restaurées (HB8 et HB9) s'individualisent par la présence d'un genre d'Ephémères (*Cloeon*), de deux genres de Coléoptères (*Haliphus*, *Helochares*), d'une famille d'Odonates (Aeshnidae avec plus particulièrement le genre *Anax*) et d'une grande partie des Hétéroptères (*Gerris*, *Micronecta*, Corixidae, *Hydrometra*).

De même, les stations restaurées ayant reçu un apport de galet (HB5 et HB7) sont principalement identifiables par la présence des Coléoptères *Anacaena* et Hydraenidae, une plus grande richesse de Diptères, une part importante des Trichoptères présents sur le tronçon (Limnephilinae, *Hydroptila*, *Hydropsyche* et *Psychomyia*) ainsi que deux Mollusques (*Anisus* et *Radix*). Il est également intéressant d'y noter l'absence totale d'Hétéroptères.

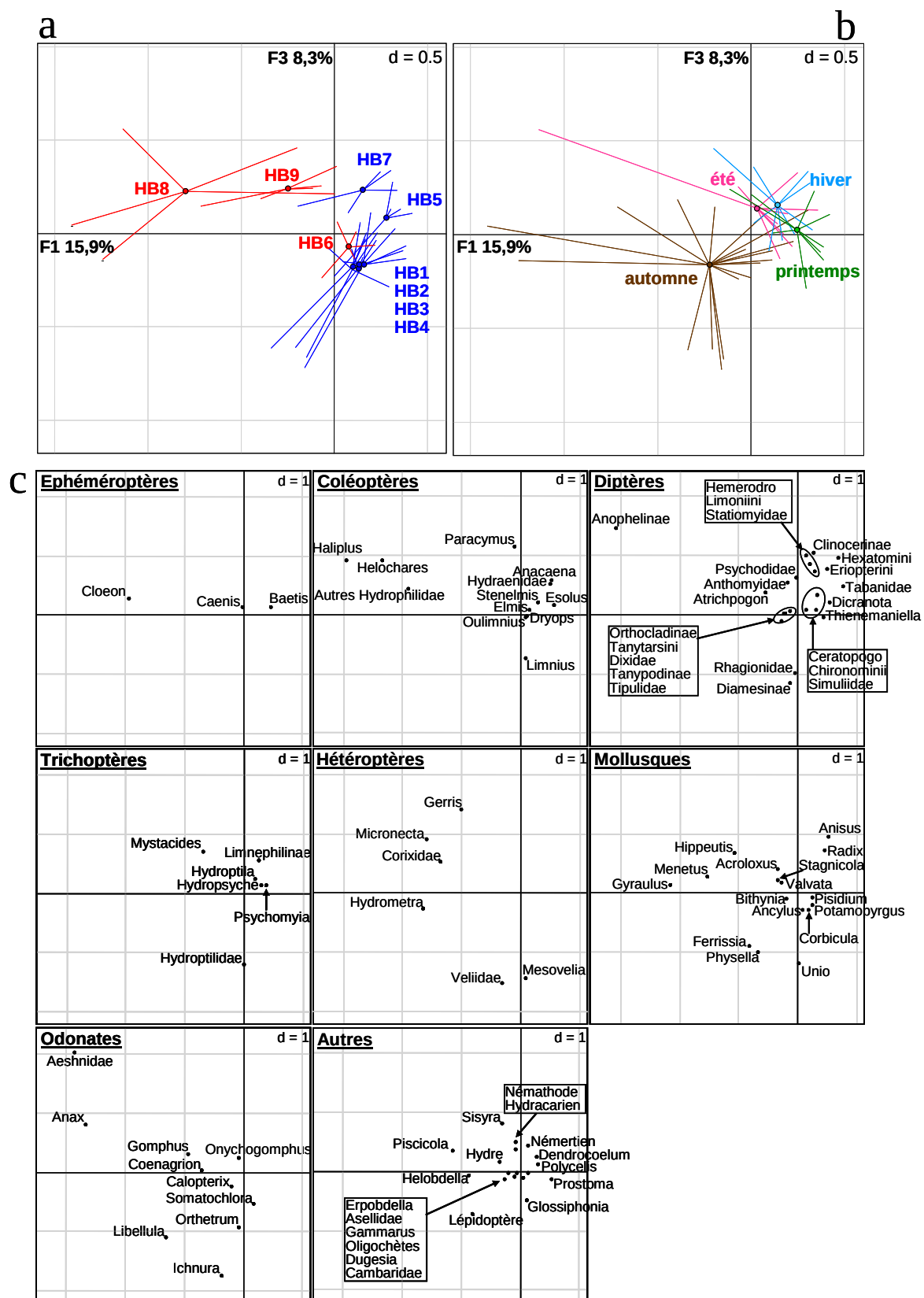


Figure 25 - AFC du tableau faunistique (93 taxons x 45 relevés). a) Projection des relevés sur le plan F1xF3 avec regroupement des relevés par station (stations restaurées en bleu et non restaurées en rouge). b) Projection des relevés sur le plan F1xF3 avec regroupement des relevés par saison c) Représentation de la position des taxons, regroupés par grand groupes taxonomiques, sur le plan F1xF3.

Indices

La Figure 26 présente l'évolution des principaux indices de composition calculés sur le tronçon.

L'abondance présente la valeur moyenne la plus importante au niveau de la station HB6 avec 14135 individus³. En moyenne, l'abondance des stations restaurées est comprise entre 8322 et 11043. L'étendue des valeurs d'abondance est plus importante au niveau des stations non restaurées et en particulier sur la station HB6 dont la valeur varie de 7978 individus en septembre 2009 à 24442 individus en mai 2009. Les valeurs d'abondance les plus faibles sont rencontrés sur les stations les plus amont. Globalement, à partir de cet indice nous notons plus un gradient amont-aval qu'une différence entre stations restaurées et non restaurées.

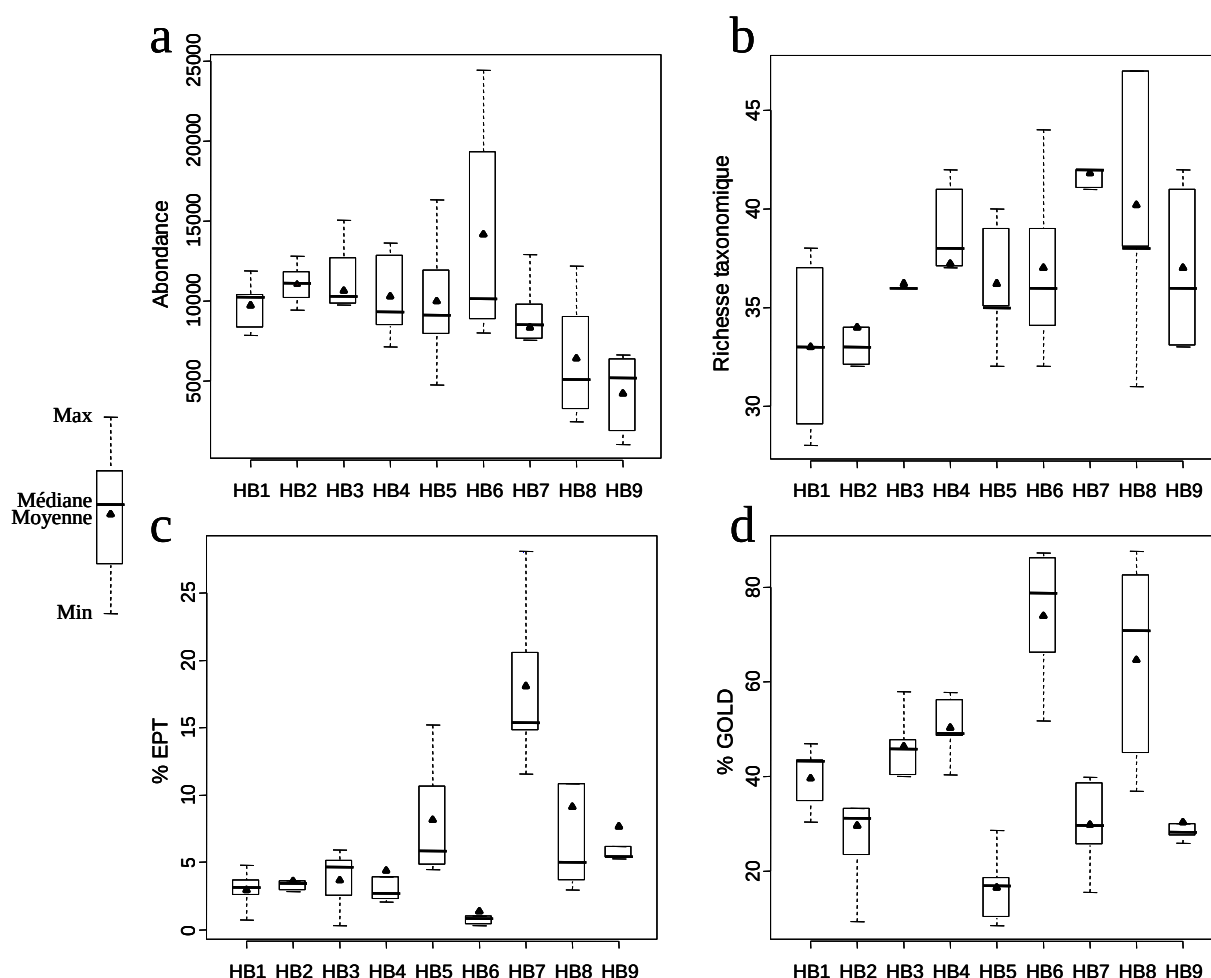


Figure 26 - Évolution des indices d'abondance (a), de richesse taxonomique (b), des pourcentages d'Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) (c) et de Gastéropodes, Oligochètes et Diptères (GOLD) (d) le long du tronçon étudié.

La richesse taxonomique ne présente pas non plus de différences particulières entre les stations restaurées et non restaurées. Les valeurs moyennes de

³ Les fortes abondances de la station HB6 sont observées en septembre 2008 et mai 2009, et sont dues à un nombre important d'Oligochètes ou de Potamopyrgus. Une forte augmentation de l'abondance des oligochètes est souvent associée aux potentialités trophiques. Une perturbation chimique ponctuelle a donc pu provoquer une surabondance d'Oligochètes qui n'est pas retrouvée lors des autres campagnes de prélèvement.

richesse sont comprises entre 36 et 37 sur les stations amont (de la station HB3 à HB9) sauf pour les stations HB7 et HB8 dont la richesse moyenne est plus élevée (respectivement 42 et 40). Les stations HB1 et HB2 ont la richesse la plus faible avec respectivement 33 et 34 taxons différents. Les étendues sont les plus importantes au niveau des stations HB1, HB8 et HB9. Les valeurs peuvent par exemple varier de 33 à 42 suivant la date de prélèvement au niveau de la station HB9. Les stations HB3 et HB7 semblent être les plus stables. Les étendues des stations non restaurées et de la station impactée par la STEP sont plus importantes, ce qui prouve une plus grande variabilité de la richesse et donc une plus forte fragilité des communautés sur ces stations.

L'évolution du pourcentage d'EPT (c) et de GOLD (Figure 26d) sur le tronçon étudié montre que parmi les stations restaurées, les stations HB1 à HB4 présentent une faible proportion d'EPT (1,3 à 4,4%) mais une assez forte proportion de GOLD (29,6 à 50,4%). Les stations HB5 et HB7 présentent les plus fortes proportions d'EPT (respectivement 8,1 et 18,1%) associées aux plus faibles proportions de GOLD (16,5 et 29,8%). La station HB6, non restaurée, présente la plus faible proportion d'EPT (1,4%) associée à la plus forte proportion de GOLD (74%). Les stations HB8 et HB9 ont une proportion d'EPT comparable à la station HB5 mais associée à une forte proportion de GOLD en ce qui concerne la station 8 (64,6%). **Les stations HB6 et HB8 présentent les plus fortes proportions de GOLD, ce qui est à associé à leurs conditions hydrauliques : ces stations présentent les conditions les plus lenticules voire quasi stagnantes. Les stations les plus remarquables d'un point de vue de la polluosensibilité de leur communautés semblent être les stations ayant reçues un apport de galets.**

Pour avoir une idée de la contribution des différents types d'habitats sur les stations restaurées et non restaurées, ces mêmes indices ont été calculés par phase (Figure 27).

Globalement, les abondances et les richesses sont les plus importantes sur les habitats marginaux.

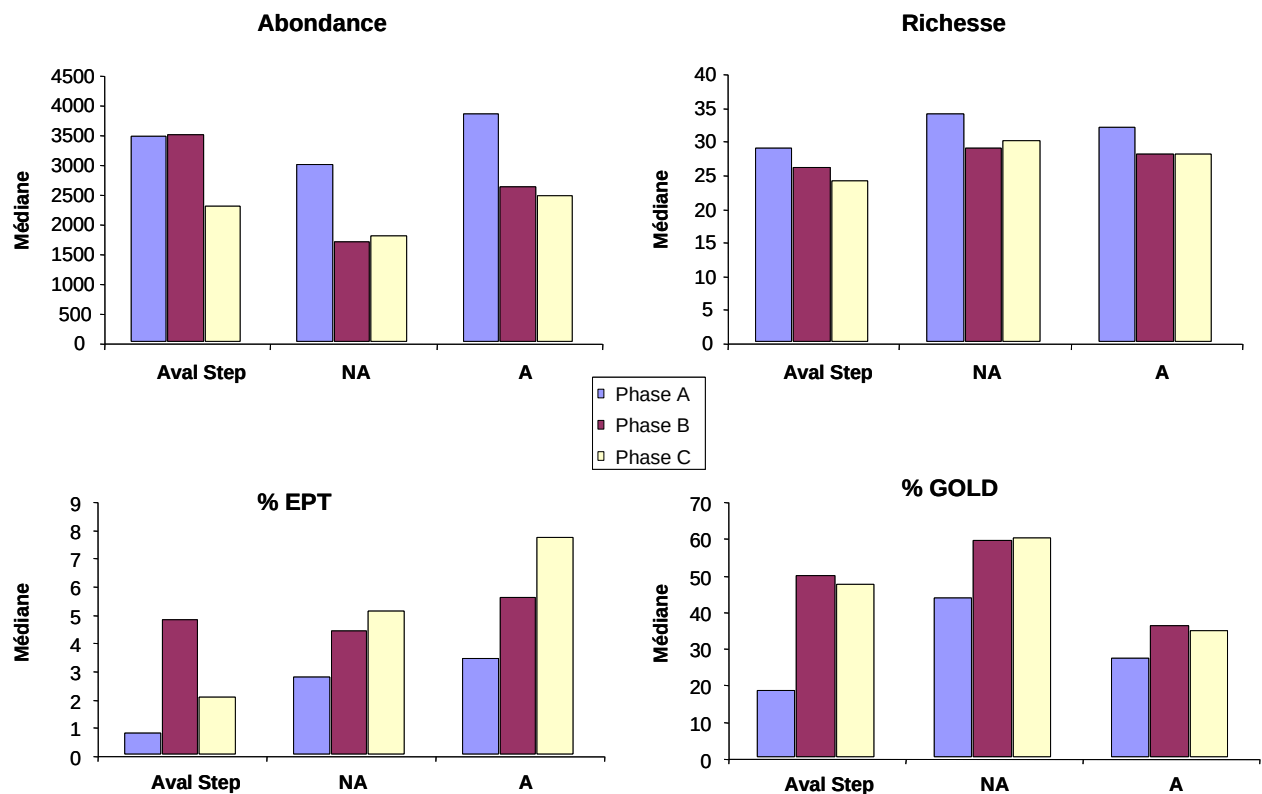


Figure 27 - Indice de composition par type de stations et par phase d'échantillonnage. « A » = stations restaurées ; « NA » = stations non restaurées ; « Aval STEP » = station HB1 ; « Phase A » = échantillonnage des habitats marginaux ; « Phase B » = échantillonnage des habitats dominants selon leur habitabilité ; « Phase C » = échantillonnage des habitats dominants au prorata de leur surface de recouvrement.

Quel que soit le type de station, les abondances et les richesses sont plus importantes dans les habitats marginaux (phase A), ce qui montre bien leur capacité d'accueil plus forte par rapport aux habitats dominants. Notons une abondance plus forte sur ces habitats dans les stations restaurées contre une richesse plus faible par rapport aux stations non restaurées.

Les indices EPT et GOLD sont très informatifs : les stations restaurées recensent plus d'EPT, mais étonnamment, ce sont sur les habitats les plus dominants qu'ils se rencontrent le plus. En revanche, les habitats marginaux contribuent plus à la proportion totale d'EPT dans les stations non restaurées par rapport aux stations restaurées. Cela tendrait à dire que sur les stations restaurées, les substrats marginaux accueillent moins de taxons sensibles que les substrats dominants.

L'indice GOLD montre des valeurs plus importantes sur les stations non restaurées où la mosaïque d'habitat est moins diversifiée, mais surtout où les vitesses de courant sont beaucoup plus lentes.

Notons par ailleurs une répartition par phase assez différente, quel que soit l'indice considéré, en aval de la STEP par rapport aux stations en amont.

Ces résultats illustrent en fait la sensibilité des taxons des différentes stations aux conditions environnementales et plus particulièrement les modifications de vitesses de courant et d'oxygénation : les stations restaurées présentent des communautés plus

rhéophiles alors que les stations non restaurées présentent une majorité de taxons polluo-tolérants représentatifs de conditions lenticques.

La Figure 28 présente l'évolution des valeurs des indices de diversité sur le tronçon étudié. Les deux indices de structure calculés (diversité de Shannon et équitabilité de Pielou) évoluent globalement de la même façon.

On distingue 3 groupes de stations :

- les 3 stations amont (HB9, HB8 et HB7) et les stations HB3 et HB4 présentant les valeurs moyennes d'indice les plus élevées
- la station HB6 présentant la valeur moyenne et l'étendue la plus faible
- la station HB5 et les deux stations aval (HB1 et HB2) présentant les étendues les plus grandes.

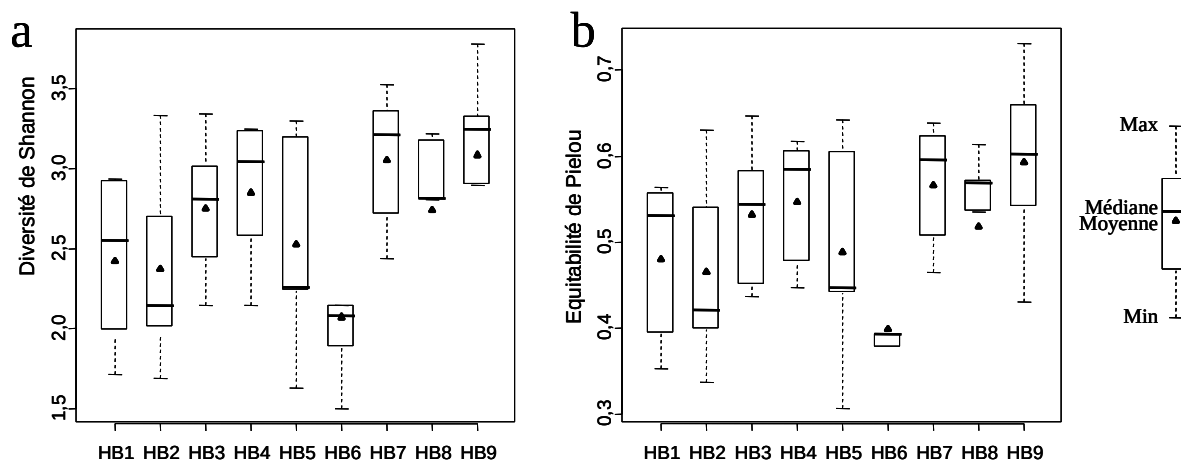


Figure 28 - Évolution des indices de diversité de Shannon (a) et d'équitabilité de Pielou (b) le long du tronçon étudié.

D'une manière générale, les diversités calculées sont plutôt bonnes (communément, une communauté est considérée diversifiée quand l'indice de Shannon tend vers 3,5) excepté pour les stations HB2 et HB6. En revanche, les communautés ne sont pas équilibrées et l'indice d'équitabilité donne des valeurs très moyennes (plus une communauté est équilibrée et plus l'indice tend vers 1), cela montre donc la dominance de certains taxons sur la totalité des stations.

Le fait marquant est la très faible diversité et la très faible équitabilité de la station HB6. De plus, la faible étendue de la boîte à moustache montre que cette observation est constante dans le temps. La station HB6 est la moins diversifiée et la plus déséquilibrée.

Nous ne pouvons pas tirer de conclusions générales sur la diversité des stations restaurées par rapport à celle des stations non restaurées.

Comme précédemment, ces indices ont été calculés à une échelle plus fine : celle des phases d'échantillonnage (Figure 29).

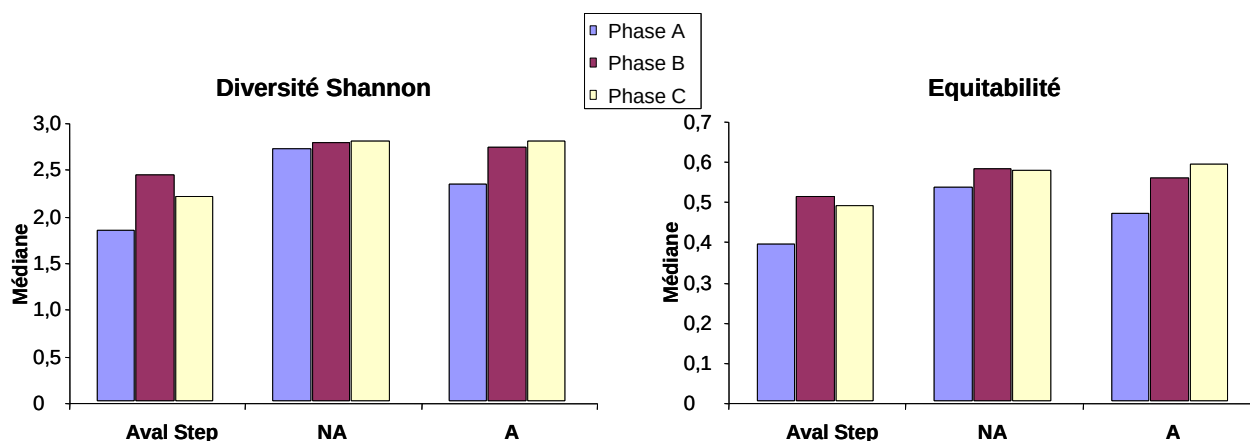


Figure 29 - Indice de structure par type de stations et par phase d'échantillonnage. « A » = stations restaurées ; « NA » = stations non restaurées ; « Aval STEP » = station HB1 ; « Phase A » = échantillonnage des habitats marginaux ; « Phase B » = échantillonnage des habitats dominants selon leur habitabilité ; « Phase C » = échantillonnage des habitats dominants au prorata de leur surface de recouvrement.

Sur les stations non restaurées, la structure des communautés est très peu différente quelle que soit la phase d'échantillonnage et, donc, le caractère biogène des substrats présents sur la station. En revanche, pour les stations restaurées, nous remarquons des communautés plus homogènes en terme de répartition des taxons et plus diversifiées dans les habitats dominants (phase B et C).

Les notes IBGN ont été calculées pour chacune des campagnes d'échantillonnage en ne considérant que les 8 habitats les plus biogènes de chaque station (Figure 30).

Les valeurs de l'indice varient en moyenne de 10 (station HB6) à 13 (station HB7). Le groupe faunistique indicateur (GFI) moyen le plus faible est celui de la station HB6. Aucune station ne présente de taxon appartenant à un GFI supérieur à 5. L'ensemble des stations est associé à une classe de qualité moyenne, excepté la station HB7 qui se situe la plupart du temps dans la classe de qualité bonne. Les stations non restaurées HB6 et HB8 présentent les plus forts écart-types (2,8 chacune).

Le détail des notes IBGN est fourni en Annexe 5. En février, la qualité est bonne sur la majorité du tronçon sauf pour les stations HB2 et HB3 (classe de qualité moyenne avec une note de 12) et le GFI est de 5 sur pratiquement toutes les stations du fait de la présence d'Hydroptilidae. Au contraire, en été et en automne, l'IBGN varie suivant les stations. Les stations HB8 et HB9, avec un GFI de 2, passent la moyenne en septembre 2008. La station HB6 présente une classe de qualité médiocre en juillet et septembre 2009. Les GFI sont plutôt constants, exceptés en mai.

Le calcul de la note IBGN ne permet pas clairement de mettre en évidence un profil longitudinal ou des différences entre sites restaurés et sites non restaurés. L'IBGN n'est donc pas adapté pour traduire de telles variations environnementales.

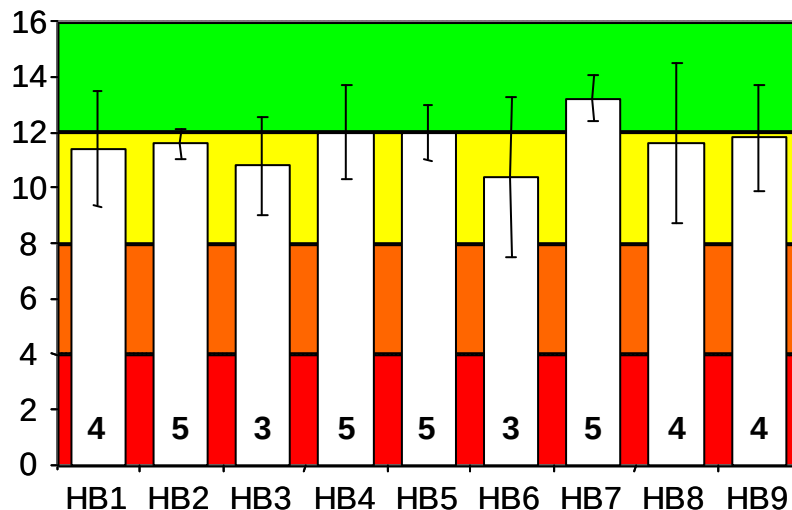


Figure 30 - Evolution de la moyenne des notes IBGN sur le Vistre à Bouillargues. Le chiffre à l'intérieur des barres correspond au groupe faunistique indicateur moyen. Le fond de couleur correspond aux classes de qualité (rouge : qualité 'mauvaise' ; orange : qualité 'médiocre' ; jaune : qualité 'moyenne' ; vert : qualité 'bonne').

III - 4.2. Approche fonctionnelle

Analyses de co-inertie

La Figure 31 permet de confronter les données faunistiques et les données relatives aux traits biologiques. Les deux premiers axes expliquent respectivement 32,2 et 18,8 % de la variance des tableaux analysés (Figure 31 a et b). Afin de faciliter l'interprétation du plan factoriel F1xF2, les relevés ont été regroupés par station (Figure 31a) et par saison (Figure 31b), et les modalités ont été regroupées par trait (Figure 31c).

Les centres de gravité des stations restaurées se concentrent à l'origine de l'axe F2 et dans la partie négative de l'axe F1. En périphérie de ce premier groupe de stations, au niveau des deux extrémités de l'axe F2 et de l'extrémité positive de l'axe F1, se situent les relevés des stations non restaurées : la station HB6 est située à l'origine de l'axe F1 et dans la moitié positive de l'axe F2 ; la station HB9 se situe dans la partie positive de l'axe F1 ; et la station HB8 se situe dans le quart positif de l'axe F1 et négatif de l'axe F2.

Cette représentation graphique sur la base les ressemblances des communautés vis à vis de leurs caractéristiques biologiques met donc en évidence un groupe homogène de stations restaurées contre des stations non restaurées qui ont visiblement des caractéristiques biologiques visiblement assez différentes entre elles.

D'un point de vue temporel (Figure 31b), les relevés de printemps et d'hiver, correspondant à la période de hautes eaux, se situent dans la partie négative de l'axe F1 tandis que ceux d'été et d'automne se concentrent à l'opposé.

La répartition des stations s'explique principalement par le mode d'alimentation, le nombre de génération par an, la nourriture, la relation au substrat, la reproduction et la taille maximale.

Ainsi, les communautés des stations restaurées, par rapport aux communautés des stations qui n'ont pas subi d'aménagements, sont composées de plus

de taxons filtreurs et racleurs, vivant plutôt de façon fixée au substrat (de façon permanente ou temporaire) ou dans le substrat (organismes interstitiel ou fousseurs) et de taille comprise entre 0,25 et 1 cm.

Parmi les stations non restaurées, la station HB6 peut être associée à des communautés macrobenthiques réunissant plus de taxons ovovivipares ou dont la reproduction est asexuée avec une taille maximale supérieure à 4 cm, par rapport aux communautés des stations restaurées. Les taxons des stations HB8 et HB9 sont quant à eux plutôt prédateurs, parasites ou perceurs, nageurs avec un nombre de génération par an inférieur à 1, et se nourrissent de plus d'animaux (macro-invertébrés et vertébrés) que ceux des stations restaurées. La station HB8 est quant à elle caractérisée par des taxons de petite taille.

Même si nous constatons quelques différences entre les profils des stations restaurées et non restaurée, globalement, les profils de traits rencontrés sur le tronçon sont plutôt représentatif de station soumises à des pollutions organiques comme les éléments nutritifs, ce qui semblerait montrer que la chimie a une rôle ici plus structurant que les modifications dues aux aménagements physiques.

L'analyse de co-inertie de la Figure 32 met en relation les données faunistiques avec celles relatives aux traits écologiques. Le premier axe factoriel explique à lui seul 59,6% de la variance des tableaux analysés et le deuxième axe, 17,9%.

Les stations restaurées et non restaurées se distinguent suivant l'axe F1. Les premières se concentrent dans la moitié positive de l'axe F1 tandis que les secondes se situent dans la partie négative. L'axe F1 permet également de séparer les relevés d'automne, dont le centre de gravité se situe dans la partie négative de l'axe F1, des relevés du reste de l'année situés dans la moitié positive.

La distinction entre les stations restaurées et non restaurées s'explique par l'altitude, la vitesse du courant, la distribution longitudinale et transversale, le statut trophique, la relation au substrat, la température et la valeur saprobiale, soit presque toutes les variables écologiques.

Les communautés macrobenthiques des stations restaurées sont composées, par rapport à celles des stations non restaurées, d'une plus forte proportion de taxons de l'étage alpin et du piedmont, préférant les vitesses de courant moyennes et rapides, vivant dans le chenal des zones du rhithron, préférant les milieux froids et oligotrophes, sur les substrats minéraux grossiers ou dans les racines et débris ligneux.

Dans la partie négative de F1, les stations non restaurées HB6, HB8 et HB9 présentent quant à elles des communautés composées de plus de taxons de plaine que les stations restaurées, préférant les vitesses de courant lentes ou nulles, comme les zones calmes de fossés et de bras morts déconnectés, dans des milieux mésotrophes ou eutrophes. Ils sont plus fréquemment rencontrés dans des litières, macrophytes, vases et limons, avec un large spectre de température eurythermes.

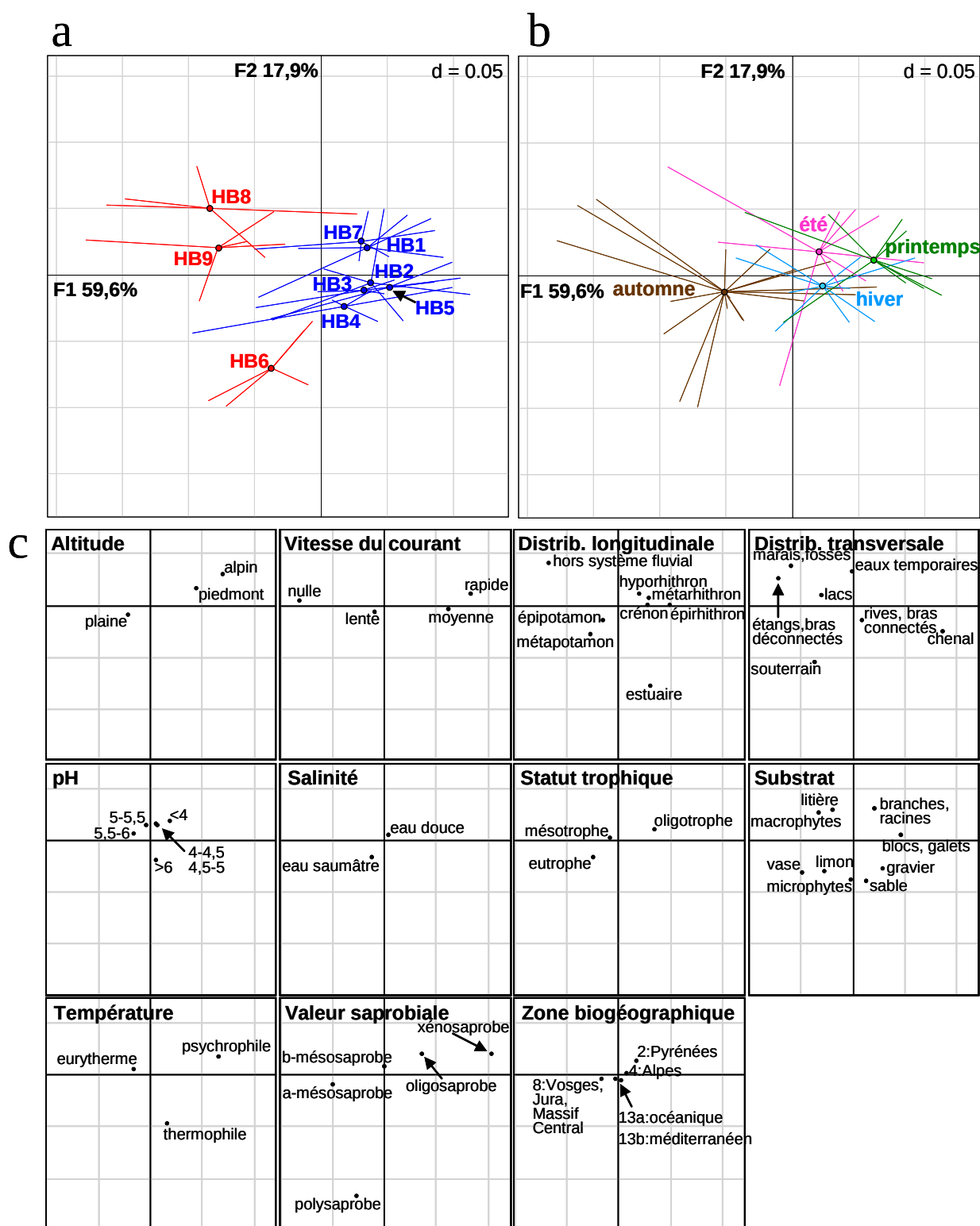


Figure 32 - Co-inertie des profils de traits écologiques et des abondances des taxons relevés en septembre 2008, février, mai, juillet et septembre 2009 sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues. a) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par station (rouge : stations non restaurées ; bleu : stations restaurées). b) Position des relevés sur le plan F1xF2 avec regroupement des relevés par saison. c) Position des modalités de 11 traits écologiques sur le plan factoriel F1xF2.

Le détail des profils stationnels de quelques traits biologiques et écologiques semblant pertinents aux regards de ces deux analyses de co-inertie sont représentés en annexe 6.

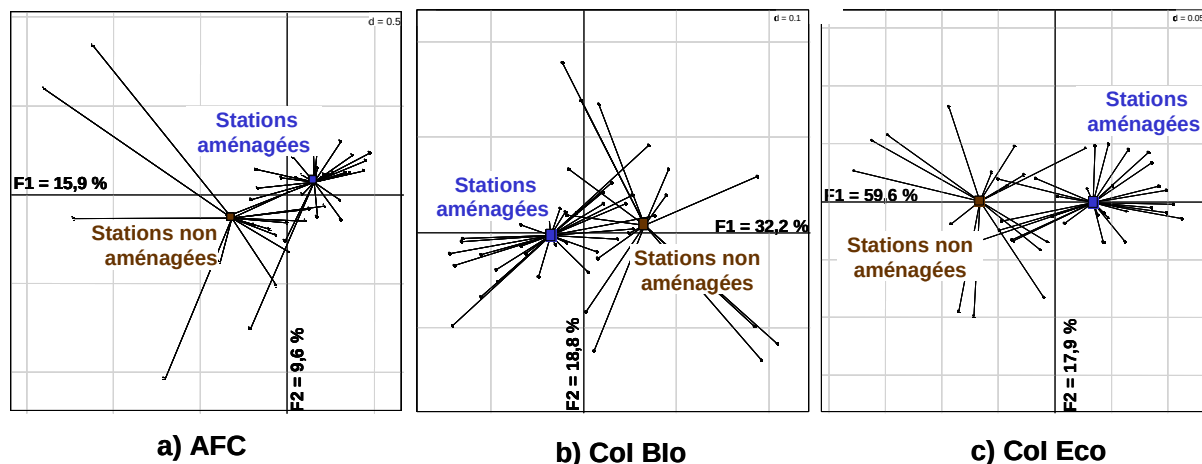


Figure 33 - Position des relevés regroupés par caractéristique des stations sur les plans factoriels de a) l'AFC faunistique, b) le couplage des informations faunistiques et biologiques et c) le couplage des informations faunistiques et écologiques.

La Figure 33 compare les 3 approches multivariées, les données faunistiques expliquent 25,5% du jeu de données, tandis que le couplage des informations faunistiques et biologiques explique 51% du jeu de données et le couplage des informations faunistiques et écologiques fournit quant à lui 77,5% d'explication. Les caractéristiques écologiques des taxons sont donc les variables qui structurent le plus la distribution des taxons sur ce tronçon. Les traits écologiques sont donc particulièrement discriminants et expliquent plus de variance que les traits biologiques entre les stations restaurées et non restaurées. Ces caractéristiques sont à mettre en relation aussi bien avec les caractéristiques physico-chimiques que physique ou dynamique du tronçon.

Le tronçon étudié se situe dans une seule hydroécorégion de niveau 2 (HER 105) et ne mesure que 2 km de long. A cette échelle, l'influence du gradient spatial naturel peut être considéré comme nulle. Pourtant, ce sont les traits écologiques qui traduisent la plus grande différence entre les sites restaurés et ceux non restaurés. Ces différences peuvent donc être assimilées aux changements intervenus depuis les travaux d'aménagement sur la composante physique du cours d'eau.

Ces résultats suggèrent que l'apport de galets et le rétrécissement du lit mouillé offrent un potentiel supérieur d'habitats pour les organismes adaptés à des vitesses de courant plus importantes, à un milieu oligotrophe, à des substrats minéraux grossiers et des températures moins élevées. Les traits écologiques pourraient donc être retenus comme indicateurs potentiels de la qualité du milieu physique dès lors qu'ils seraient comparés à un référentiel local.

Indice de diversité fonctionnelle et groupes fonctionnels

La Figure 34 présente l'évolution de l'indice de diversité fonctionnelle en comparaison avec l'indice de diversité taxonomique le long du Vistre à Bouillargues. Sur le profil longitudinal, les deux indices suivent la même tendance. Au niveau des trois stations situées en amont (stations HB7 à HB9) les valeurs des indices sont relativement constantes. Elles chutent au niveau de la station HB6 où elles atteignent leur plus bas niveau et remontent dès la station HB5. Au niveau des stations HB3 et HB4, les valeurs des deux indices remontent au même niveau que celles des stations HB7 à HB9. On observe une baisse légère des deux indices au niveau des stations HB1 et HB2.

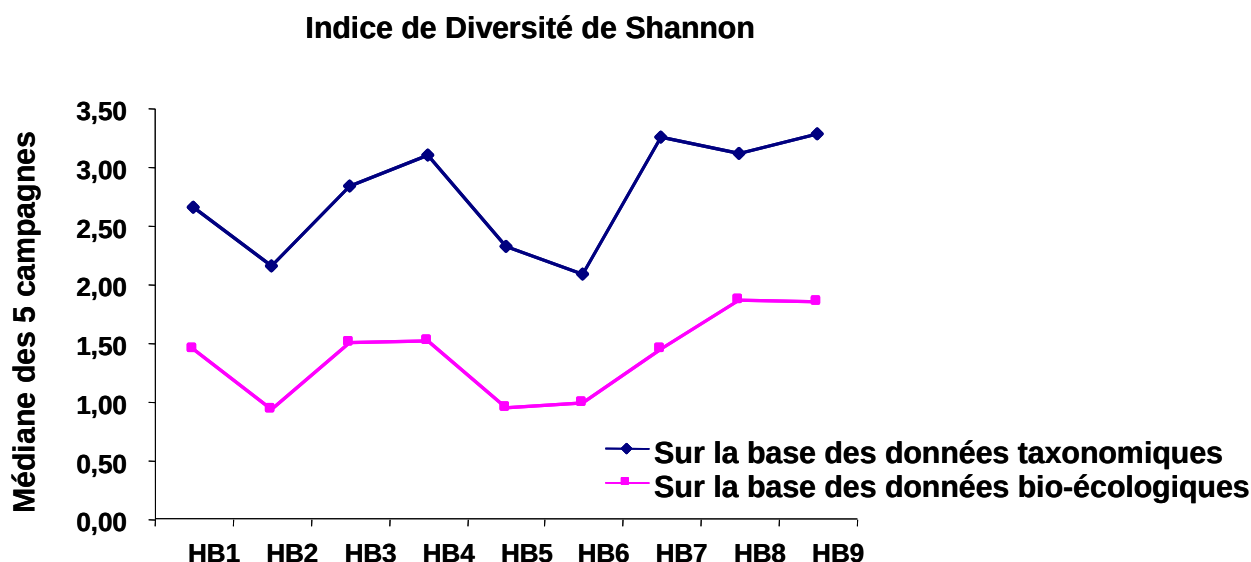


Figure 34 - Évolution de la moyenne des indices de diversité taxonomique et fonctionnelle (calculée sur la base des 9 sous groupes bioécologiques) sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues.

L'indice est minimal lorsque dans un peuplement chaque taxon est représenté par un seul individu et quand un taxon regroupe presque tous les individus du peuplement. C'est probablement la raison pour laquelle les valeurs des indices de diversité calculées sur les données bio-écologiques sont si faibles par rapport à la diversité taxonomique : pour chaque station la plupart des sous-groupes doivent être représentés par peu d'individus, et un sous-groupe bioécologique doit être dominant. Les fonctionnalités bio-écologiques sont ici trop peu diversifiées pour permettre un bon calcul de cette diversité.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons regroupé les taxons cette fois par groupe bioécologique. La Figure 35 présente le pourcentage moyen de chaque groupe fonctionnel présent sur les 9 stations. Très peu de taxons appartiennent au groupe δ dont le pourcentage moyen ne dépasse pas 4%. Les stations HB8 et HB9 présentent une majorité de taxons appartenant au groupe γ (respectivement 48 et 47%), 25 à 30% au groupe β et à peine 20% au groupe ζ . La station HB6 se distingue des autres stations par la plus forte proportion de taxons du groupe ζ (78%) et la plus faible proportion du groupe β (16%). Au contraire, la station HB7 présente une part importante de taxons du groupe β avec 63% et une faible proportion du groupe ζ (8%). Globalement les stations restaurées suivent la même tendance que la station HB7. Ce qui confirme notre hypothèse de départ : un groupe bioécologique est dominant par station, excepté pour les stations HB8 et HB9 qui ont les plus fortes diversités.

La station HB6 serait principalement composée d'organismes uni à plurivoltins, utilisant souvent les œufs ou les cocons comme stade de résistance, et la dérive comme tactique de dispersion. Ils seraient ovovivipares ou ont une reproduction asexuée. Ce sont essentiellement des filtreurs ou collecteurs, se nourrissant de fines particules organiques ou détritus, avec une respiration branchiale ou tégumentaire. Leur taille et leur affinité au substrat étant très variable pour ce groupe.

Les stations restaurées seraient dominées par des communautés composées d'organismes plus représentatifs du rhithron avec des environnements oligo-mésotrophes, se rencontrant plus particulièrement dans les zones de chenal et de berges des cours d'eau de piedmont ou plaine. Les individus auraient une taille petite à moyenne, et seraient plutôt oligo à mésosaprophes et eurythermes, rhéophiles et utilisant une respiration aquatique.

Ce regroupement en groupe bioécologique synthétise toutes les observations réalisées à une échelle plus fine via les analyses de co-inertie.

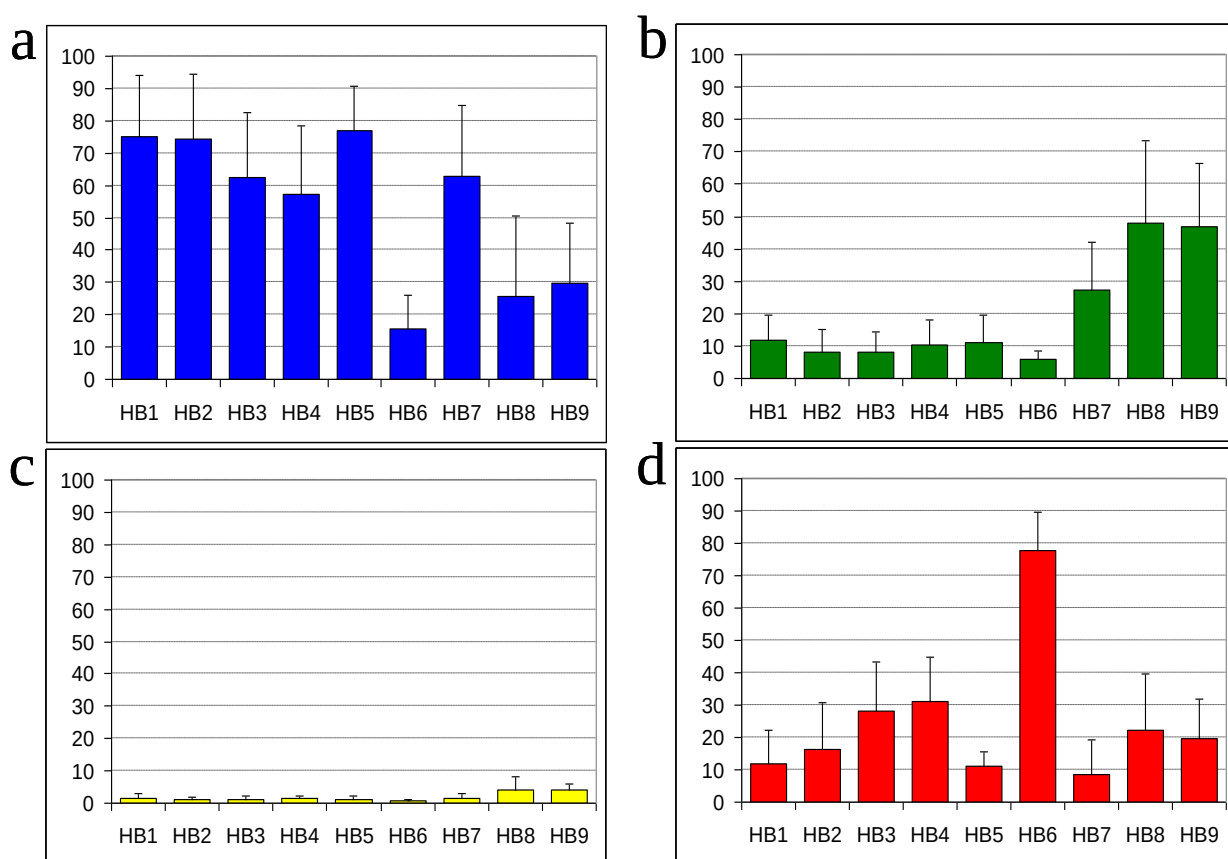


Figure 35 - Évolution du pourcentage moyen de taxons appartenant aux groupes fonctionnels β (a), γ (b), δ (c) et ζ (d) sur le tronçon du Vistre à Bouillargues.

III - 5. Processus biochimiques microbiens

Les activités enzymatiques microbiennes mesurées traduisent une potentialité de dégradation et de transformation de la matière organique, en particulier en hydrolysant des composés fortement polymérisés (hydrate de carbone type lignine ou cellulose, protéines) et en les transformant en molécules de faible masse assimilables par les microorganismes (glucose, acides aminés,...).

Elles sont identifiées de façon générique en tant qu'enzymes extracellulaires (EEC), car physiquement situées à l'extérieur des cellules, soit fixées, soit libres, dans l'environnement cellulaire (Chrost, 1991). Elles ont un rôle amont essentiel dans la minéralisation de la matière organique et donc dans l'autoépuration des milieux aquatiques. Cette dernière étape, dont les processus sont bien identifiés (respiration, dénitrification, méthanisation) est fréquemment assurée par des consortiums enzymatiques ou bactériens. La spécificité plus ou moins grande des populations microbiennes assurant ces fonctions traduit leur niveau de redondance fonctionnelle, et donc leur niveau de sensibilité aux facteurs environnementaux ou à d'éventuels contaminants. C'est ainsi que la respiration est un processus fortement redondant car assuré par toutes les souches bactériennes, aérobies et anaérobies ; à l'opposé la méthanisation est assurée par un groupe restreint de microorganismes, actifs dans des gammes restrictives de conditions environnementales (teneur en MO élevée, anoxie, potentiel d'oxydoréduction très bas).

La présence et l'intensité de l'activité microbienne traduisent donc des spécificités environnementales.

III - 5.1. Milieux sédimentaires

En sédiment, compte tenu des densités bactériennes élevées, les EEC ont généralement des activités marquées, en relation avec des facteurs environnementaux classiques tels que teneur en carbone, température, pH, la granulométrie.... D'un sédiment à l'autre, les écarts sont cependant importants.

Les valeurs observées sur les sédiments du Vistre sont particulièrement élevées et témoignent d'une capacité de dégradation de matière organique intense (figure 36) avec une variabilité importante d'une campagne à l'autre :

- de 200 à 400 μ moles hydrolysées/g de sédiment sec.heure pour la Xylosidase
- de 400 à 1200 μ moles hydrolysées/g de sédiment sec.heure pour Glucosidase. Ces deux valeurs témoignent d'un MO plutôt peu polymérisée et facilement biodégradable.
- de 400 à 900 μ moles hydrolysées/g de sédiment sec.heure pour Pep.

A titre de comparaison, les travaux de Blanc (2005)⁴ ont montré que des sédiments de rivière du Beaujolais (rivière Ardière) développaient des activités enzymatiques de dégradation de la matière organique d'un facteur 1000 fois inférieures à celle des sédiments du Vistre (glucosidase : de 4 à 100 nmol/g.h ; Xylosidase : de 10 à 30 nmol/g.h ; LAP : de 50 à 120 nmol/g.h).

⁴ Blanc L., 2005, Impact de pressions polluantes sur le fonctionnement de communautés microbiennes aquatiques. Application à un bassin versant rural sous influence viticole, Mémoire Master 2, U. Blaise Pascal Clermont Ferrand II – Cemagref Lyon, 48P + annexes.

Les secteurs HB3 et HB5 en 07/2009 avaient la particularité de ne pas avoir de dépôts sédimentaires ; le fond était le substrat marneux de « roche » mère. HB1 en Juillet 2009 est une mesure effectuée sur du substrat de fond (marne). La différence avec les sédiments déposés dans les mouilles et les massifs de macrophytes, est notable: les 5 activités de biodégradation sont nettement plus faibles dans les marnes, la numération est impossible (car trop de particule d'argile gênant les observations microscopiques). Compte tenu de la compacité de ces marnes, ces zones ne développeront qu'un très faible potentiel de biodégradation et une très faible contribution à l'autoépuration du cours d'eau.

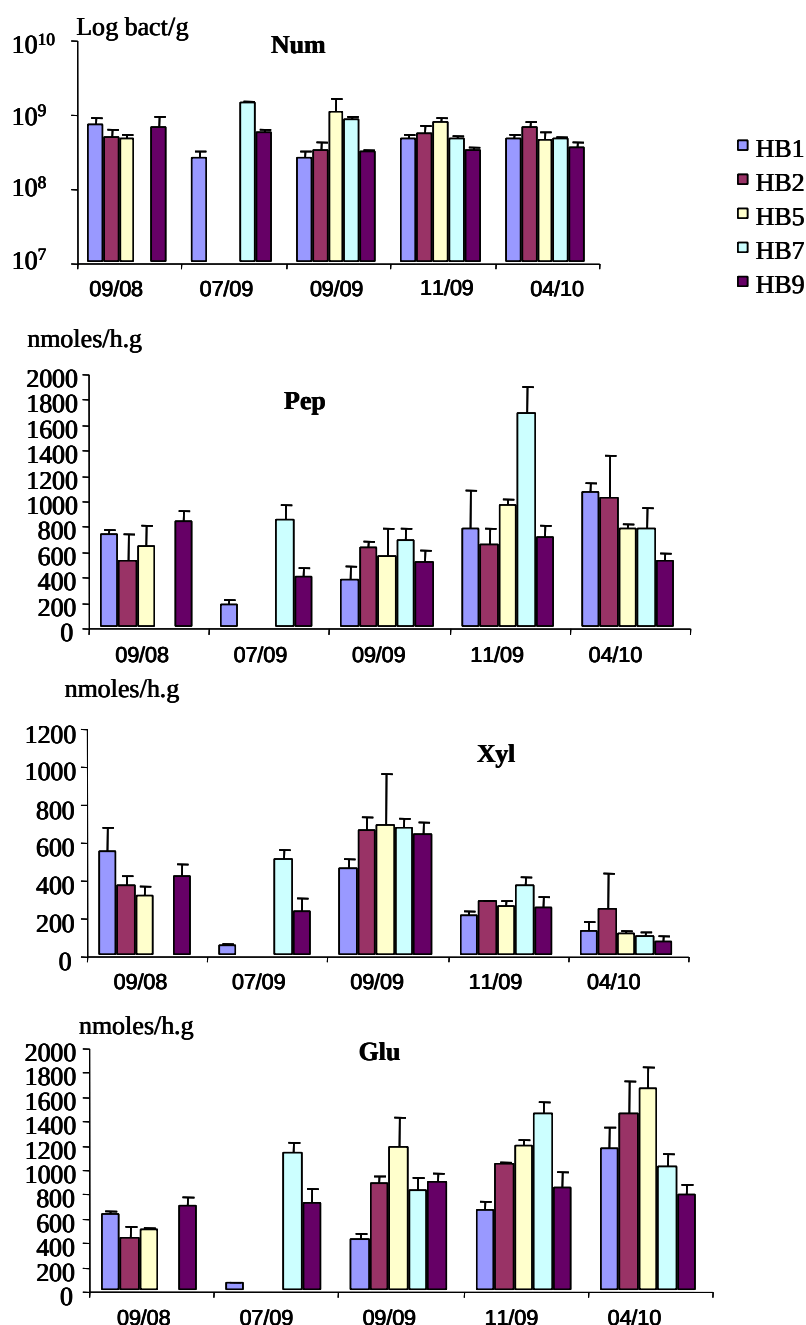


Figure 36 - Intensité des activités EEC. HB1 à HB9: points d'échantillonnage d'aval et amont sur le Vistre (cf figure 1 pour la localisation).

Un schéma similaire apparaît pour les activités de minéralisation (Figure 37), avec une faible intensité des processus respiratoire sur HB1 sur marne (07/2009). Il est vraisemblable qu'une grande partie des variations temporelles observées soit liée aux changements de qualité sédimentaire (granulométrie), en interférence avec des changements de température et d'oxygénation du milieu. La dénitrification élevée est en partie liée à la forte disponibilité des nitrates (de 5 à 30mg/L – cf. Annexe Chimie). La présence d'une activité de méthanisation est plus faible mais réelle.

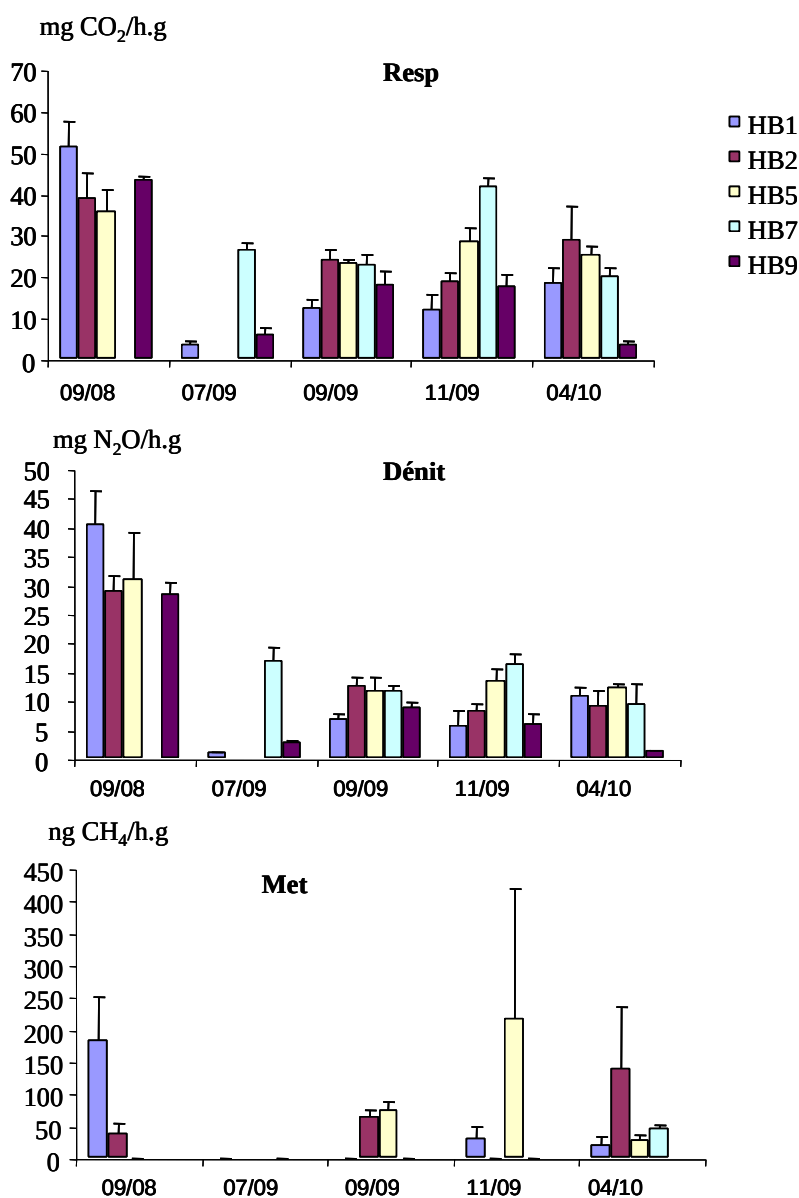


Figure 37 - Minéralisation de la matière organique et potentiel d'autoépuration des microorganismes sédimentaires le long du Vistre.

A titre de comparaison, les travaux menés sur des sédiments de l'Ardière (Beaujolais) ont donné des activités respiratoires < 1500ng CO₂/g.h et de dénitrification comprises entre 300 et 1500ngN₂O/g.h, soit des activités

respectivement 100 à 200 fois plus importantes sur le Vistre pour la respiration, et de 100 à 600 fois plus élevées pour la dénitrification⁵.

Une explication de ces différences est liée à la densité bactérienne qui est 50 à 100 fois plus élevée dans les sédiments du Vistre (Figure 38) que dans ceux de l'Ardière (entre 3 et 5 10⁸ cell/g).

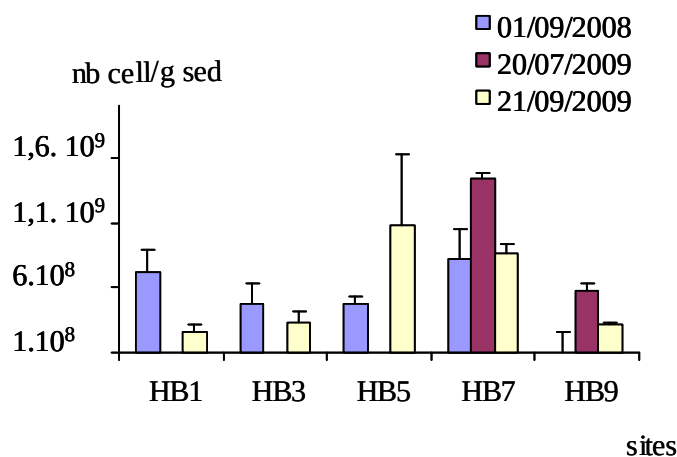


Figure 38 - Densité bactérienne dans les sédiments du Vistre.

Au final, il semble ainsi n'exister aucun patron spatial d'organisation des processus microbiens, en particulier d'amont en aval, ni d'organisation temporelle.

III - 5.2. Biofilms

Les biofilms développés sur les cailloux se retrouvent sur presque tous les sites. Il s'agit essentiellement de petits cailloux-galets (de 1 à 5-6 cm) rapportés lors des opérations de restauration pour recréer de la diversité physique au Vistre. Ces cailloux sont cependant très mobiles, en fonction des crues. Le site amont HB9 n'a pas été rechargé,

En termes de biomasse globale, les biofilms sont bien développés et reflètent les concentrations élevées de nutriments, en particulier en phosphore (Figure 39). Sur une autre rivière (Ardière, Beaujolais), les biomasses périphytiques sont beaucoup plus faibles de 0,1 à 0,5 µg/cm² (Blanc, 2005), mais le milieu était impacté par des phytosanitaires et les teneurs en PO₄ étaient plus faibles.

Comme précédemment, il ne semble pas exister de structuration temporelle ni spatiale de ces biomasses, essentiellement algales.

⁵ Corcoll-Cornet N., 2006, Réponse de processus microbiens sédimentaires à un gradient de pollution en rivière. Master 2 INSA, ENTPE-Cemagref Lyon, 64p.

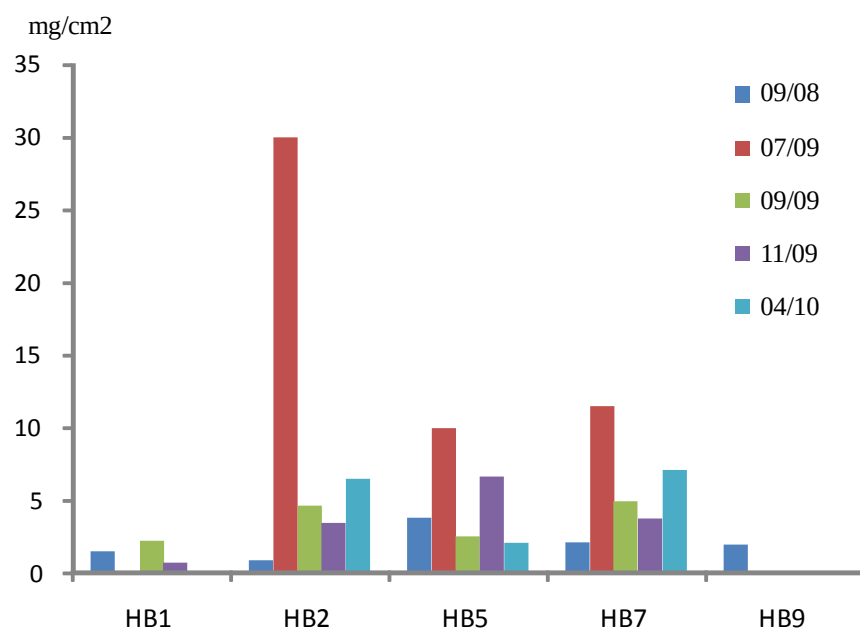


Figure 39 - Évolution spatiale et temporelle des masses de biofilms épilithiques.

Les activités enzymatiques de biodégradation (hydrolyse de MO) exprimées par ces biomasses (Figure 40) sont du même ordre de grandeur que celle trouvées par Blanc (2005) sur un autre cours d'eau, dans des conditions environnementales moins eutrophes⁶.

⁶ in Blanc 2005 : Glu de 3 à 10 nmol/cm².h, Xyl de 2 à 6 nmol/cm².h et Pep de 10 à 40 nmol/cm².h

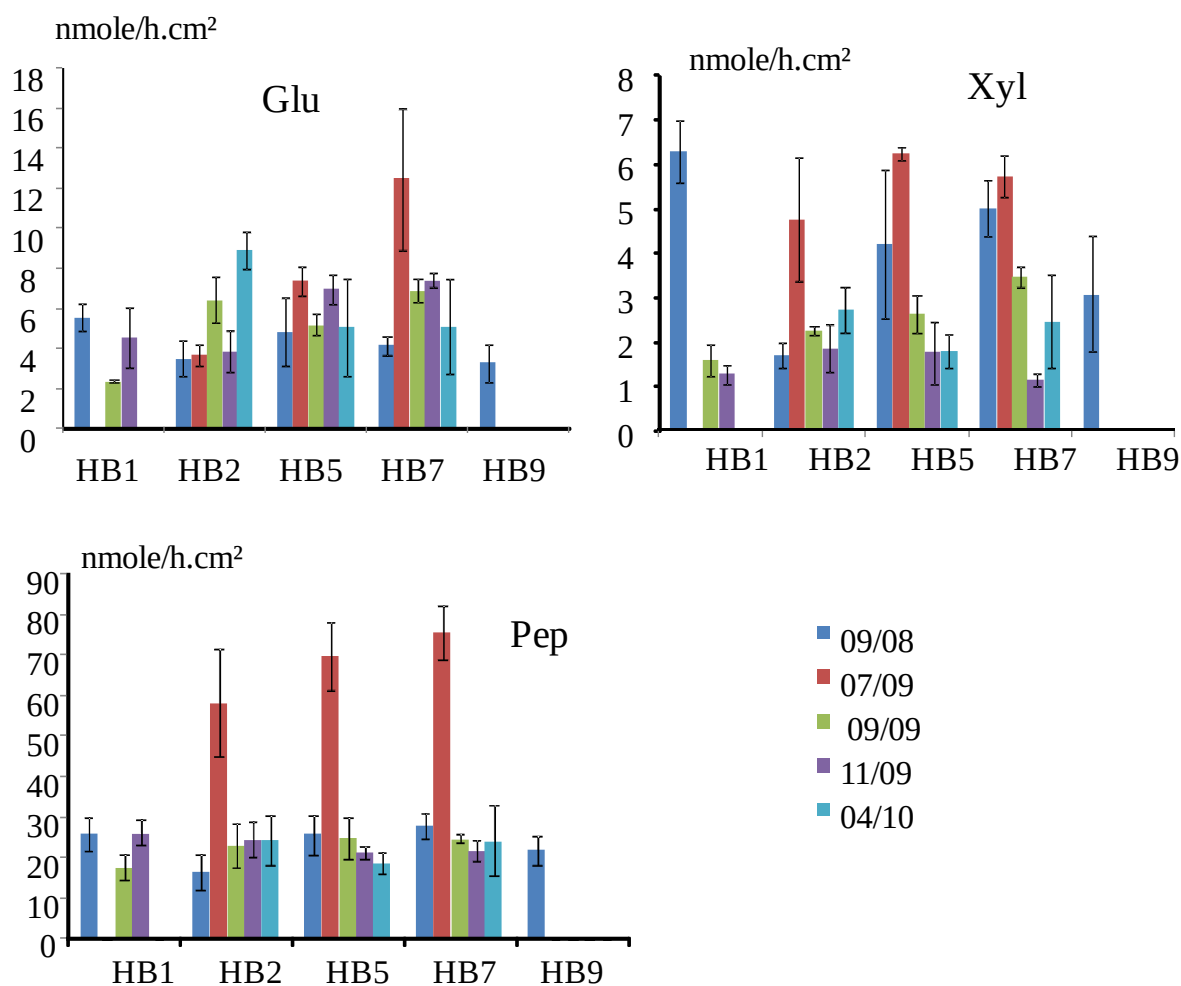


Figure 40 - Activités enzymatiques d'hydrolyse de la matière organique dans les biofilms du Vistre.

Les activités respiratoires, comme en sédiment, sont élevées (Figure 41). Seules la respiration et la dénitrification ont pu être mesurées. Le fait que les biofilms développent une capacité potentielle de réduction des nitrates indiquent, non seulement la forte charge en nitrate, mais également la possibilité de structuration du biofilm, lié à son épaisseur, permettant l'installation de populations microbiennes dénitrifiantes. Celles-ci s'exprimeront quand les conditions d'oxygène seront suffisamment faibles. Dans le cas de la rivière Ardières (Blanc 2005), la respiration était 1000 fois plus faible et la dénitrification inexistante.

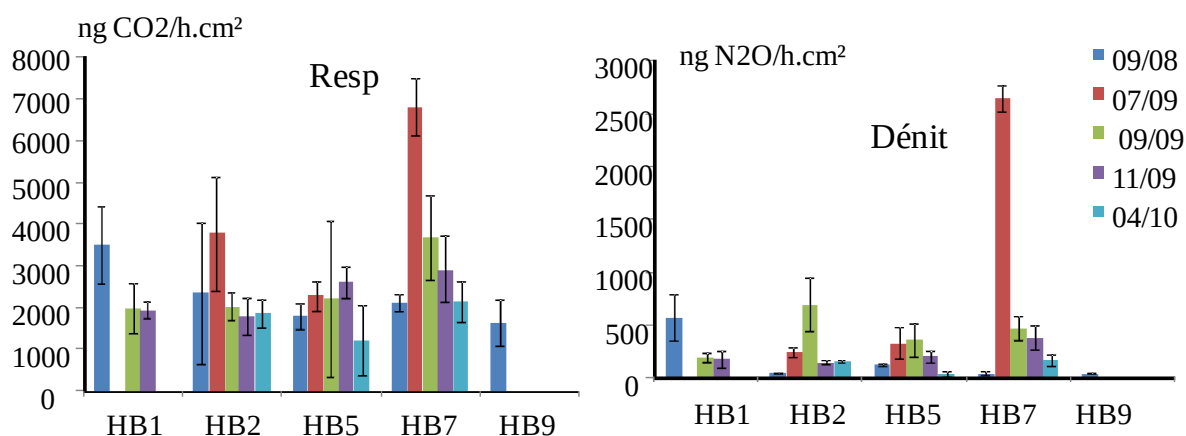


Figure 41 - Processus respiratoires dans les biofilms épilithiques du Vistre.

III-5.3. Relations diversité, fonctions et conditions environnementales en sédiment

En termes de diversité bactérienne, les empreintes génétiques évaluées par la méthode ARISA permettent d'identifier une organisation temporelle (fig 42) (Fechner, 2011).

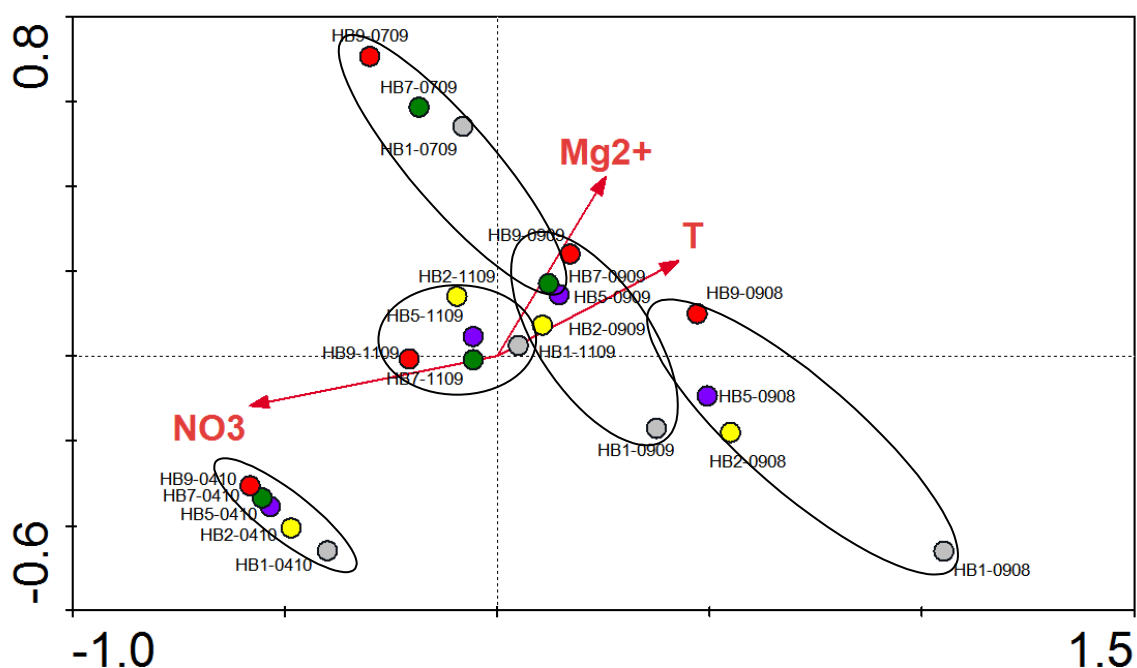


Figure 42 - Analyse de redondance de la diversité bactérienne en sédiment, avec l'ordination des sites (caractérisés par leur diversité bactérienne) et les principaux facteurs physico-chimiques. HB -xyyy: points d'échantillonnage – mois –année. Chaque couleur représente 1 site : en gris HB1, en jaune HB2, en violet HB5, en vert HB7, en rouge HB9. Axe 1 = 11,3 % ; axe 2 : 5,4 %.

Le rôle de Mg^{2+} , que l'approche statistique met en avant, n'est pas expliqué. Enfin, on peut noter que, dans les groupes temporels, HB1 et HB9 sont souvent positionnés de la même façon par rapport à l'axe 2. Ceci pourrait indiquer l'existence d'un patron d'organisation spatiale entre le site amont HB9 (forestier, non restauré) et le site aval HB1, restauré et sous l'influence du rejet de la station d'épuration.

Au final, seuls trois facteurs physico-chimiques (parmi ceux analysés) ressortent en tant qu'éléments explicatifs et influent sur la diversité bactérienne des échantillons. Le pourcentage d'explication (moins de 20 % au total sur les 2 axes) est cependant faible et indique que d'autres facteurs de contrôles existent, qui n'ont pas été pris en compte ici. Il n'existe en tout état de cause pas de facteurs de forçage environnemental suffisamment marqués pour entraîner une structuration nette de la diversité bactérienne sédimentaire, que ce soit sur un plan temporel ou sur un plan spatial.

Si l'on considère la diversité fonctionnelle de ces communautés sur chaque site de mesure, l'analyse par RDA donne une image différente de la structuration spatiale et temporelle (Figure 43).

Le site HB9 se distingue des autres : plus faible intensité de l'ensemble des processus étudiés, qui peut s'expliquer par une abondance plus faible de particule de type limon ($< 50 \mu m$). A ce type de fraction granulométrique est fréquemment associé des teneurs en MO plus importantes et une densité bactérienne associée plus élevée, ce qui induit des potentiels fonctionnels plus important.

On peut noter que le processus le mieux associé à cette fraction 0-50 μm est la méthanisation, processus qui nécessite des teneurs en MO élevées et des conditions d'anoxie. Ces conditions sont typiques des dépôts sédimentaires fins.

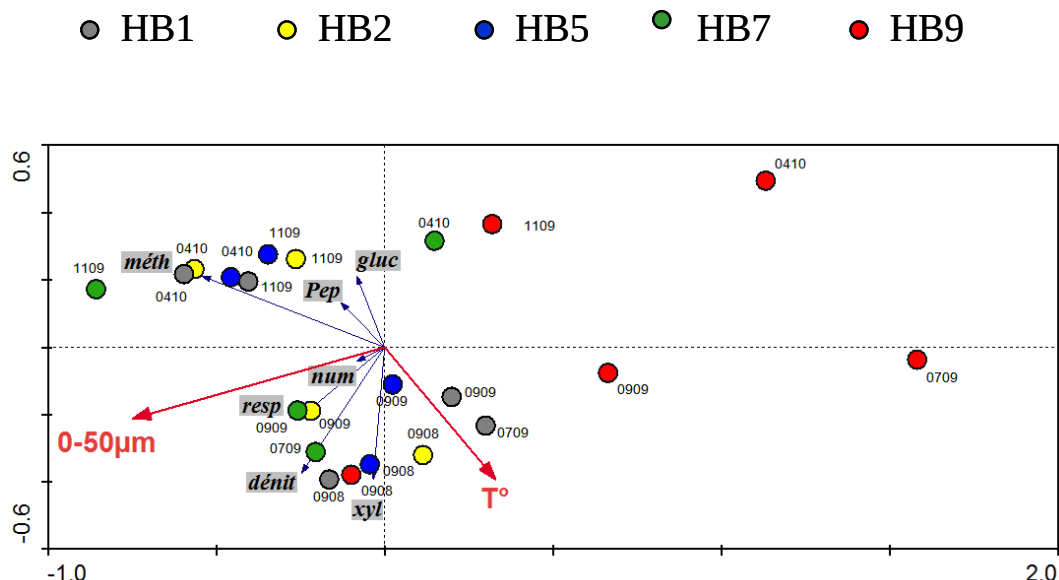


Figure 43 - Ordination conjointe des fonctions microbiennes sédimentaires, des sites et des facteurs environnementaux significatifs, en fonction des dates d'échantillonnage. Axe 1 : 30,3 % ; Axe 2 : 7,4 %.

L'axe 2 semble contrôlé par la température : les échantillons d'avril et de novembre sont regroupés au dessus de l'axe 1, ceux de septembre et juillet en dessous.

Les processus sont contrôlés différemment. Ainsi la glucosidase et la xylosidase, enzymes intervenants dans la dégradation de la matière organique dissoute polymérisée, apparaissent comme très sensibles à la température, tout comme la dénitrification. La respiration et la peptidase répondent de façon similaire aux deux principaux facteurs de forçage (température et teneur en limon).

La température et la granulométrie expliquent 1/3 de la variabilité de cette diversité fonctionnelle. Il apparaît un patron saisonnier et une originalité du site HB9, forestier, non restauré. Les autres sites ne se distinguent pas entre eux.

Enfin, seule la température est un facteur explicatif commun à la diversité bactérienne et à la structure fonctionnelle des communautés microbiennes sédimentaires.

III - 6. Diatomées : indices et diversité

Un nombre total de 123 taxons ont été identifiés ; les 38 espèces représentant plus de 1% d'abondances relatives cumulées sont listées dans le Tableau 10, avec leurs biovolumes cellulaires moyens respectifs. Des formes anormales des taxons APED, CPLA, EOMI, ESBM, KGES, NIFR, PLFR et RABB et *Bacillaria paxillifera* (O.F. Müller) Hendey var. *paxillifer* (non dominante) ont également été identifiées et regroupées sous le code TRTG.

Tableau 10 - Liste des taxons dominants et des codes correspondants.

CODE TAXON	NOM COMPLET TAXON	BIOVOLUME (μm^3)
ADMI	<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarnecki	76
APED	<i>Amphora pediculus</i> (Kützing) Grunow	41
ARPT	<i>Achnanthes rupestoides</i> Hohn	198
CEUO	<i>Cocconeis euglyptoides</i> (Geitler) Lange-Bertalot	2533
CMEN	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	1244
CPLA	<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg var. <i>placentula</i>	2963
CPLI	<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg var. <i>lineata</i> (Ehrenberg) Van Heurck	2871
DCOF	<i>Diadmesmis confervacea</i> Kützing var. <i>confervacea</i>	416
EOMI	<i>Eolimna minima</i> (Grunow) Lange-Bertalot	88
ESBM	<i>Eolimna subminuscula</i> (Manguin) Moser Lange-Bertalot & Metzeltin	112
GPAP	<i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing var. <i>parvulum</i> f. <i>parvulum</i>	326
GPRI	<i>Gomphonema pumilum</i> var. <i>rigidum</i> Reichardt & Lange-Bertalot	270
GPUM	<i>Gomphonema pumilum</i> (Grunow) Reichardt & Lange-Bertalot	270
HVEN	<i>Halamphora veneta</i> (Kützing) Levkov	1994
KGES	<i>Kolbesia gessneri</i> (Hustedt) Aboal	289
LGOE	<i>Luticola goeppertiana</i> (Bleisch in Rabenhorst) D.G. Mann	925
MVAR	<i>Melosira varians</i> Agardh	3267
NAMP	<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow f. <i>amphibia</i>	337
NCPL	<i>Nitzschia capitellata</i> Hustedt in A.Schmidt & al.	549
NCPR	<i>Navicula capitatoradiata</i> Germain	705
NCTE	<i>Navicula cryptotenella</i> Lange-Bertalot	386
NDIS	<i>Nitzschia dissipata</i> (Kützing) Grunow var. <i>dissipata</i>	625
NIFR	<i>Nitzschia frustulum</i> (Kützing) Grunow var. <i>frustulum</i>	258
NPAL	<i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W.Smith	391
NTPT	<i>Navicula tripunctata</i> (O.F.Müller) Bory	966
NVDS	<i>Naviculadicta seminulum</i> (Grunow) Lange Bertalot	69
NVEN	<i>Navicula veneta</i> Kützing	279
NZSU	<i>Nitzschia linearis</i> (Agardh) W.M.Smith var. <i>subtilis</i> (Grunow) Hustedt	807
PLFR	<i>Planothidium frequentissimum</i> (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	219
PRST	<i>Planothidium rostratum</i> (Østrup) Lange-Bertalot	267
PTCO	<i>Platessa conspicua</i> (A. Mayer) Lange-Bertalot	130
RABB	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (C. Agardh) Lange-Bertalot	568
RUNI	<i>Reimeria uniseriata</i> Sala Guerrero & Ferrario	456
SANG	<i>Surirella angusta</i> Kützing	1315
SBRE	<i>Surirella brebissonii</i> Krammer & Lange-Bertalot var. <i>brebissonii</i>	2654
SOVI	<i>Surirella ovalis</i> Brebisson	4409
SSVE	<i>Staurosira venter</i> (Ehr.) Cleve & Moeller	315
UULN	<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	4724
TRTG	Formes tératogènes	-

III - 6.1. Approches « indicielles »

Les indices diatomiques classiquement utilisés sur le territoire français – Indice de Polluo-sensibilité Spécifique IPS (Coste in Cemagref, 1982) et Indice Biologique Diatomées IBD (Coste et al., 2009) – indiquent des niveaux de qualité d'eau médiocre à moyenne (Figure 44). Les valeurs respectives d'IBD et d'IPS varient de 7,9 et 7,6 (HB7) à 14,0 et 14,2/20 (HB1).

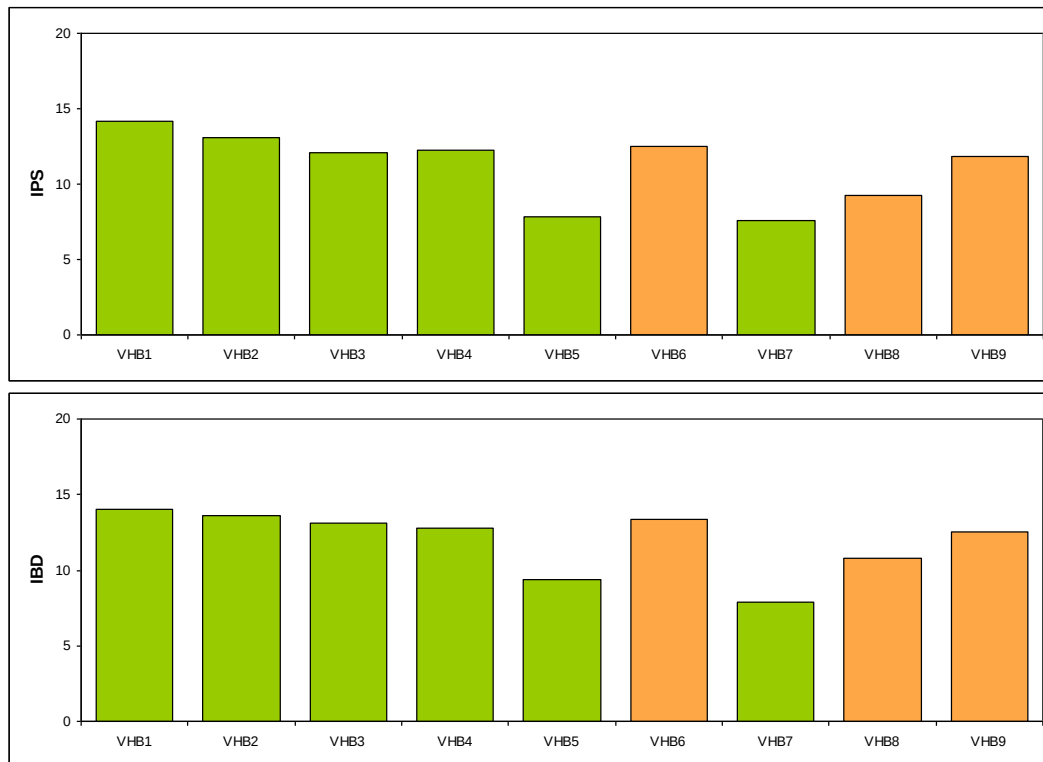


Figure 44 - Valeurs des indices IPS et IBD aux différentes stations. Les histogrammes en orange représentent les zones non restaurées, les verts les zones restaurées.

III - 6.2. Analyses taxonomiques et « traits » écologiques

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) basée sur la composition spécifique des communautés de diatomées (Figure 45) traduit plus de 90% de la variance totale. Le long de l'axe 1 (73.8% de la variance observée) se séparent nettement les sites amont (HB5 à 9) et aval (HB1 à 4). Les sites aval sont caractérisés par une forte présence d'espèces de grande taille, notamment 3 espèces de *Cocconeis* (CEUO, CPLA et CPLI). Dans ces sites domine également l'espèce rhéophile RABB, traduisant vraisemblablement la présence de courants plus soutenus dans ces zones aval.

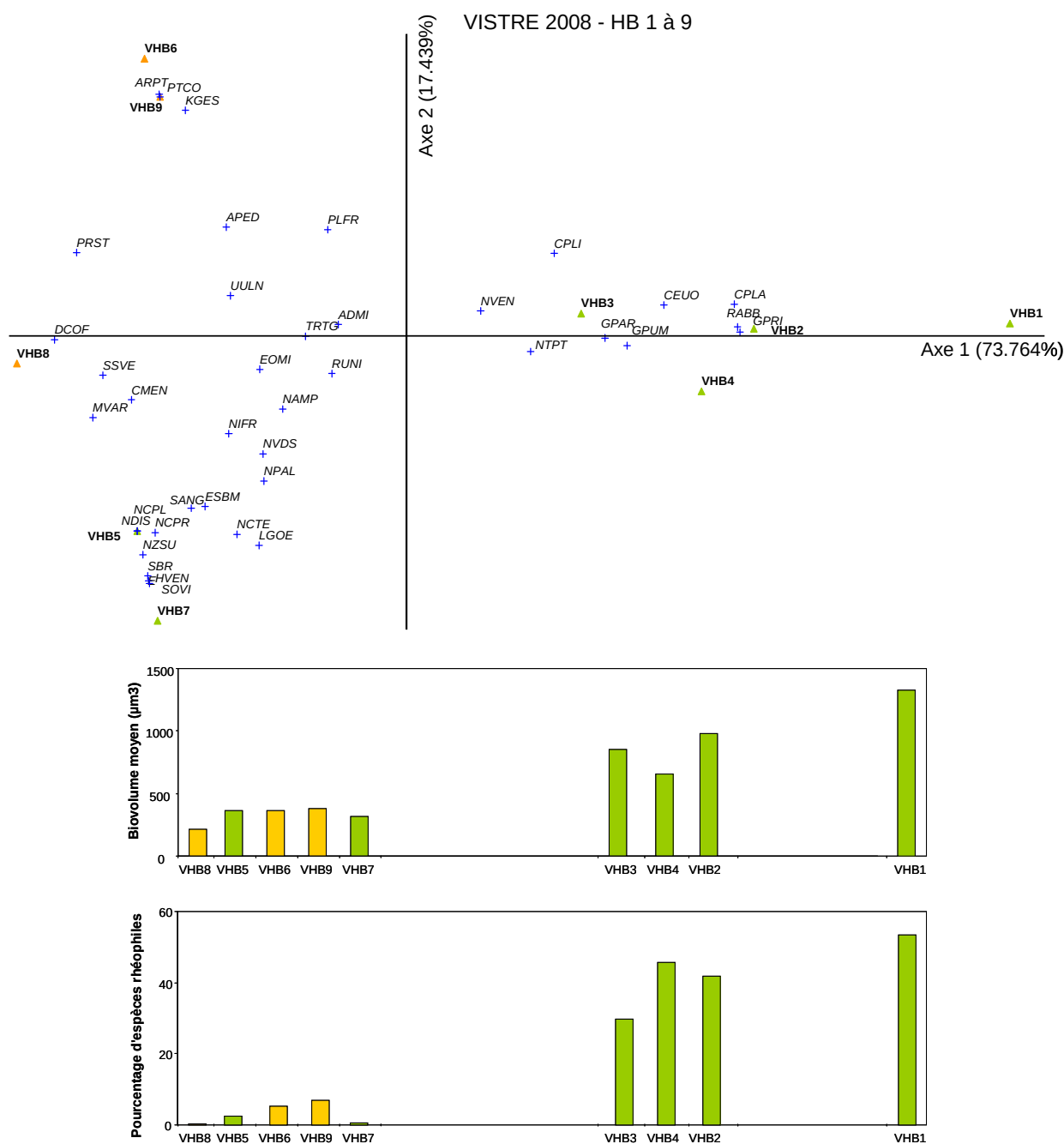


Figure 45 - ACP sur les espèces dominantes et répartition des biovolumes et du pourcentage de taxons rhéophiles (Denys, 1991) le long de l'axe 1.

Notons par ailleurs l'effet probable de l'ombrage sur ces organismes photosynthétiques, susceptible d'être traduit par la proportion d'espèces morphologiquement anormales (Figure 43, $R^2 = 0,59$). L'occupation végétale des berges est bien plus faible en HB1-5 (avec des valeurs moyennes de l'indice de couverture de $2,5 \pm 0,5$) qu'en HB6-9 ($7,8 \pm 0,4$), où l'on rencontre les abondances les plus importantes de diatomées déformées. Bien que traduisant généralement un stress de type toxique, l'apparition de déformations a été rapportée dans des environnements physiques instables, avec des conditions de courant faible – parfois de sécheresse – et des variations d'intensité lumineuse (Antoine & Benson-Evans, 1984). Même si généralement l'on assimile le « stress lumineux » à une exposition excessive à la

lumière, il est possible que le manque de lumière soit également responsable d'un développement anormal des cellules.

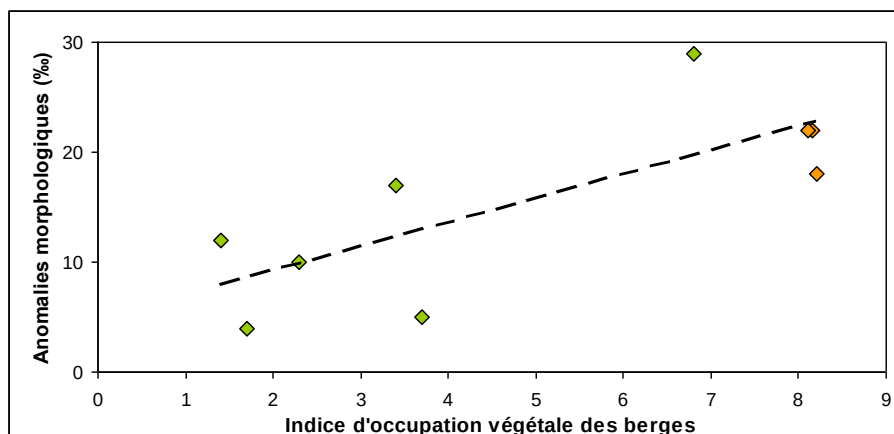


Figure 46 - Relation entre les abondances relatives de taxons déformés et l'occupation végétale des berges.

III - 6.3. Impact de l'aménagement des sites sur la diversité spécifique.

Pour les secteurs restaurés, la diversité spécifique tend à décroître entre l'amont (3,71 à HB7) et l'aval (1,95 à HB1). La diversité taxonomique est globalement plus faible au niveau des stations non restaurées (HB6, 8 et 9) que dans les sites restaurés les plus proches (HB5 et 7). Bien que ces stations amont soient globalement caractérisées par les mêmes taxons, des changements de structure s'observent également (cf. gradient le long de l'axe 2 de l'ACP, Figure 45) et la structure des communautés des sites restaurés est plus équilibrée, alors que les sites HB6, 8 et 9 sont largement dominés par la petite espèce APED (Figure 47).

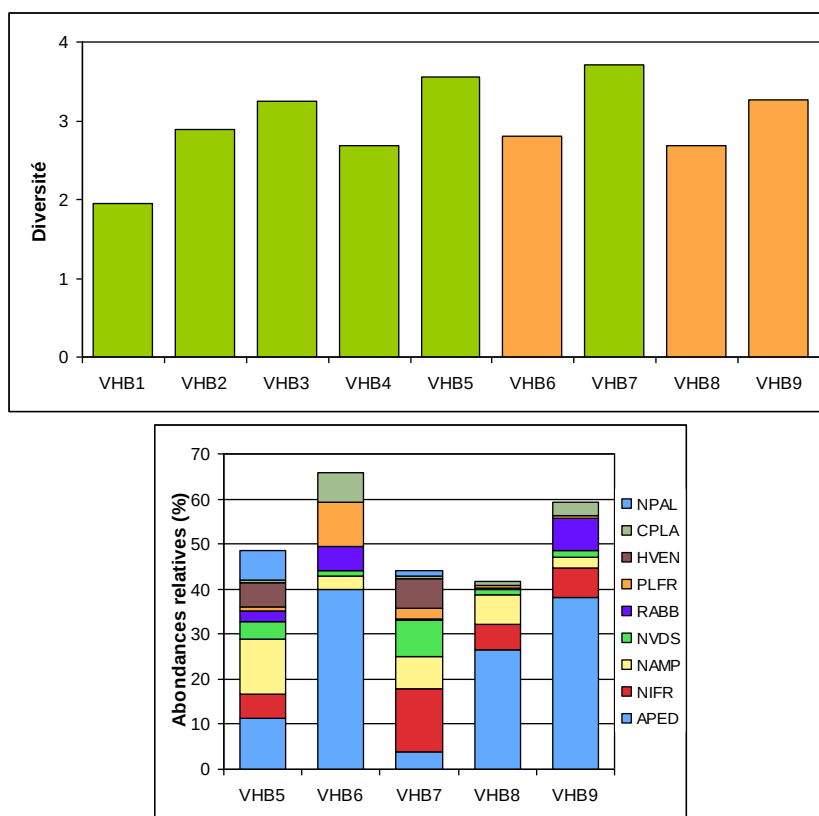


Figure 47 - Indices de diversité de Shannon sur les 9 stations du Vistre à Bouillargues et abondances relatives des espèces dominantes dans les stations amont.

IV - Éléments de conclusion par chapitre

IV - 1. Hydromorphologie

☺ La reconfiguration du chenal d'étiage a dynamisé l'écoulement, et les radiers du secteur restauré ont, à l'époque de l'étude hydromorphologique, une granulométrie dominante possédant une bonne capacité d'accueil. Leur proportion (9% en surface) est toutefois faible, mais elle reflète le contexte topographique local.

☺ La capacité d'accueil benthique est renforcée par la présence de chevelus racinaires issus de la ripisylve. Près de 20% des structures décrites dans le nouveau chenal en possèdent à des degrés divers de développement.

☹ ☹ L'omniprésence des formations végétales est certes une offre d'habitabilité supplémentaire (65% des structures décrites hors saison végétative), mais leur prolifération peut contrer l'effet de dynamisation attendu par la restriction du lit d'étiage.

☹ Il semble que l'on assiste au départ d'une grande partie des granulats grossiers dans le secteur restauré. Les zones de « roche-mère » atteignent des pourcentages importants dans les plats et les mouilles.

IV - 2.Chimie et processus microbiens

☺ La qualité de l'eau est fortement dégradée, en particulier les teneurs en phosphore et en nitrates sont très déclassantes. Le rejet de la station d'épuration aggrave encore le phénomène. Quelle que soit la campagne de suivi, la mauvaise qualité d'eau est constante dans le temps. Aucune amélioration spatiale amont-aval n'apparaît sur ce court tronçon.

☺ ☹ Les processus microbiens de biodégradation de matière organique et contribuant à l'autoépuration sont intenses. Certains processus comme la méthanisation reflètent cependant des conditions sédimentaires très dégradées (fermentation). Un effet structurant de la granulométrie sédimentaire est visible, tant sur les processus que sur la diversité.

☺ Malgré leur intensité, ces processus n'auto-épurent pas suffisamment sur un aussi court tronçon et n'améliorent pas la qualité chimique du milieu. Il semble n'y avoir aucune structuration spatiale amont -aval. Une certaine saisonnalité apparaît (via le facteur température).

IV - 3.Macrophytes

☺ Sur le secteur étudié, la végétation aquatique est abondante et relativement diversifiée. Son analyse générale a mis en évidence une évolution assez classique des végétaux des zones restaurées de cours d'eau.

☺ ☹ L'analyse des points de suivi communs aux différents éléments biologiques étudiés (stations "HB") apporte assez peu d'informations supplémentaires. En effet, ces relevés précis ne présentent pas de différences majeures avec les relevés généraux effectués tout le long du profil : seules quelques rares espèces supplémentaires ont été trouvées mais elles ne présentent pas une importance capitale dans l'analyse et l'interprétation. Ceci met en évidence que la richesse des communautés de macrophytes n'est pas encore très élevée, puisqu'un relevé précis ne complète pas de manière notable les inventaires portant sur les espèces principales. L'analyse des points HB devra donc trouver tout son sens dans l'approche multicompartimentale.

☺ ☹ Depuis 2006 (étude Asconit-Consultant), la diversité des héliophytes et des hydrophytes a augmenté de manière notable, ce qui semble démontrer une amélioration de la qualité globale du milieu. Cette conclusion serait toutefois à préciser, car il est probable que le protocole employé en 2006 ne permettait pas d'avoir un inventaire exhaustif des espèces présentes.

☺ La restauration de radiers, de la sinuosité et de l'hétérogénéité du substrat s'est traduite par la diversification des faciès d'écoulement, entraînant une augmentation de la richesse spécifique. La plantation de végétation rivulaire, augmentant l'ombrage sur la rivière, est un élément important de contrôle des espèces susceptibles de proliférer, au profit d'une plus grande diversité.

☺ D'après les résultats issus de cette analyse des peuplements macrophytiques quatre ans après la restauration physique de cette partie du cours d'eau, le Vistre à Bouillargues montre une amélioration sensible de ce compartiment biologique. Cette amélioration de la structure biologique doit être considérée comme la première phase d'une réhabilitation plus complète des compartiments et des fonctionnalités écologiques qui restent toutefois fortement pénalisées par la médiocre

qualité des eaux, facteur dominant de contrôle du peuplement végétal aquatique dans le contexte particulier du Vistre.

☹ L'approche en termes d'évaluation de la qualité du milieu réalisée par l'application de l'Indice Biologique Macrophyte Rivière (IBMR) a confirmé la relative médiocrité de cette qualité, traduite par un niveau trophique beaucoup plus élevé qu'il devrait l'être dans ce type de cours d'eau. Quant à l'effet bénéfique que l'on peut attendre de la diversification des faciès sur la qualité de l'eau elle-même, favorisant des processus d'autoépuration, la longueur modeste du secteur restauré ne permet pas de voir un effet significatif. La récupération de cette fonctionnalité écologique ne peut s'envisager que pour la restauration complète de l'ensemble d'un cours d'eau, ou au moins pour un tronçon équivalent à une unité fonctionnelle complète (plusieurs kilomètres pour un cours d'eau du type du Vistre).

IV - 4. Invertébrés

☹☹ Que ce soit du point de vue taxonomique ou bioécologique, des différences sont observées entre les communautés des stations restaurées et non restaurées aussi bien en termes de composition que de sensibilités taxonomiques.

☹ En termes de structure, aucune amélioration de la diversité taxonomique ou fonctionnelle n'est observée.

☹ L'IBGN n'est pas adapté pour traduire les aménagements du milieu quand la pression polluante globale reste forte dans le cours d'eau.

☹ L'apport de galets semble être l'aménagement le plus positif sur la composition et le fonctionnement des communautés macrobenthiques.

☹☹. Même si quelques tendances ressortent, les résultats ne sont pas assez significatifs pour décrire précisément une typologie taxonomique ou fonctionnelle des sites restaurés et non restaurés.

IV - 5. Diatomées

☹ L'IBD et l'IPS traduisent clairement un gradient amont-aval de meilleure qualité pour les stations restaurées.

☹ La diversité spécifique tend à décroître de l'amont vers l'aval.

☹☹ Le taux d'anomalies morphologiques est corrélé positivement avec l'indice d'occupation végétale des berges

V - Éléments de synthèse

Par construction, une méthode d'évaluation d'un état écologique, élaborée selon un processus d'écart à une situation de référence, n'est pas apte à traiter de l'aspect prédictif d'une action de restauration si on ne connaît pas les mécanismes ayant conduit à l'état qualifié de référence ; l'état de référence étant défini comme l(es) état(s) du système écologique atteint(s) dans un contexte des contraintes environnementales naturelles.

De plus actuellement de façon explicite, l'impossibilité de faire référence à un fonctionnement naturel, est traduite par la catégorie des situations dites « fortement

modifiées », pour lesquelles l'écart aux conditions naturelles est tel que sa qualification n'a guère de sens dans cette attitude méthodologique.

Donc pour l'instant, à défaut d'une autre méthode à bâtir sur d'autres bases théoriques, et pour capitaliser toutefois des acquis sur les actions entreprises, les volets suivants sont investis par : (1) la possibilité de construire une connaissance fonctionnelle de l'état zéro, avant actions, et (2) la mise en place d'un croisement méthodologique susceptible de fournir a priori divers regards sur les réponses exprimées dans le système que l'on veut faire évoluer.

La seule application de plusieurs méthodes descriptives de la qualité et du fonctionnement, sur une même problématique de restauration, offre un avantage majeur en permettant de statuer sur deux aspects du questionnement évaluatif post-action : la hiérarchie des contraintes locales et la différenciation des informations obtenues par chacune des méthodes mises en œuvre.

Globalement, ces aspects inter-méthodologiques peuvent être organisés/restitués en trois volets :

- (a) les aspects discriminants entre le contexte non-restauré et le contexte restauré,
- (b) les options de restauration évaluées a posteriori selon leurs points forts et leurs points faibles,
- (c) les préconisations envers les options de suivis.

Les tableaux suivants tentent de résumer l'exercice ci-dessus, appliqué à la restauration physique du Vistre à Bouillargues.

BOUILLARGUES / compartiments	<i>Evaluation conjoncturelle des aspects discriminant les contextes restaurés (r) / non-restaurés (nr)</i>
Physico-chimie	pas d'effet notable de la restauration sur ce compartiment. Tronçon trop court pour voir une réponse.
Hydromorphologie	métriques simples et démonstratives des états <i>r</i> / <i>nr</i> en description instantanée (géométrie, écoulement, granulométrie dominante) ; à replacer toujours dans un contexte historique hydroclimatique si une tendance existe.
Activités bactériennes	Permet de révéler au niveau global un niveau d'intensité de l'activité de transformation de la matière organique (sédiments et biofilms). Pas d'effet <i>r</i> / <i>nr</i> et nettement un effet substrats.
Macrophytes aquatiques	Composition du peuplement sensible à la couverture végétale rivulaire ; semble marquer davantage une évolution globale à long terme plutôt qu'un aspect discriminant <i>r</i> / <i>nr</i> ; caractérise ici un état global médiocre.
Microphytes Diatomées	Pas d'effets clairs <i>r</i> / <i>nr</i> ; Variabilité interannuelle très forte 2008-2009 probablement en rapport avec une transition de l'hydraulicité interannuelle ; fortes interactions locales avec la couverture végétale rivulaire. Gradients inverses entre qualité et diversité.
Macro-invertébrés	Réponse taxonomique positive entre <i>r</i> et <i>nr</i> en rapport avec la dynamisation d'écoulement et l'habitabilité granulométrique accrue. Réponses fonctionnelles (traits de vie) non significatives contenues par la pression polluante existante.

BOUILLARGUES / compartiments	<i>Points forts / Points faibles des actions de restauration réalisées.</i>
Physico-chimie	point faible : non-intervention sur une pression polluante forte limitant les réponses des compartiments biologiques aux aménagements physiques.
Hydromorphologie	Points forts : tracé recalibré induisant une dynamisation de l'écoulement ; intervention granulométrique favorisant l'habitabilité benthique ; lit et terrasses inondables favorisant en crue le ralentissement et l'atténuation des forces tractrices sur le lit mouillé. Points faibles : annexes fluviales offertes à la prolifération de plantes invasives ; instabilité des granulats grossiers ; absence de bois mort au fond du lit mouillé bloquant/limitant le charriage des granulats les plus gros.
Ripisylve	Point forts : réduction de l'ensoleillement direct ; tenues des berges ; mixité buissons et arbres ; développement rivulaire de systèmes radiculaires très accueillants pour la faune benthique aquatique et les juvéniles de poisson. Points faibles : veiller à implanter sur la rive « sud ». Nécessité d'un entretien visant à contenir la fermeture du paysage suite à un développement excessif de la ripisylve.
Zone réaménagée :	Points forts : création d'une zone humide associée au Vistre et propice à la biodiversité animale et végétale (cf étude Asconit).

BOUILLARGUES / compartiments	Préconisations sur les options de suivis
Physico-chimie	Connaître dynamique des températures (pas de temps recommandé 1/4h) => permettre calcul de seuils de dépassement. Détecter des améliorations précoces du système par des bilans nycthéméraux simples (oxygène dissous, température) sur une période hebdomadaire, par exemple aux équinoxes et solstices => permet le calcul de métriques simples dans la balance photosynthèse-respiration. Lever les pressions chimiques par réduction des intrants ponctuels ou diffus
Hydromorphologie	Surveillance allégée des évolutions des formes et des assemblages granulométriques ; connaître dynamiques des débits (pas 1 h). Expérimenter une rétention/blocage du charriage (bois mort) de fond en zones peu profondes pour augmenter la puissance alluviale et les interactions des écoulements (surface/hyporhéique). Réapprovisionner en galet de granulométrie variée. Entretien de la ripisylve.
Activités bactériennes	Leurs qualifications permettent de situer le niveau global d'activités et de statuer éventuellement sur une pression toxique inhibitrice. Des séquences de zones de dépôts sédimentaires et de biofilms sur galets favoriseront une diversité des processus d'autoépuration.
Microphytes diatomées et Macrophytes aquatiques	Homogénéiser le choix des sites, pour minimiser les interférences majeures avec des conditions locales (luminosité). Contrôle des invasives (Jussies) et des macrophytes en général afin de limiter leur impact sur l'hydrodynamique du Vistre restauré et sur la diversité des macrophytes.
Macro-invertébrés	Saisonnaliser les échantillonnages ; discriminer l'information benthique par types de mésohabitats décrits précisément et évalués en terme de représentativité. Intercomparer les métriques, du plus simple (richesse, performance des occurrences) au plus complexe (diversités taxonomique et fonctionnelle ; densités). Les densités doivent être traitées/interprétées, a minima, selon leur appartenance à des classes de taille adaptées aux taxons (petit, moyen, grand) Maintien d'habitats diversifiés, à granulométrie variée, chevelu racinaire, zones à macrophytes...

5/ Références de précédentes études et bibliographie citée

- AFNOR NF T 90-350 (2004) Détermination de l'Indice Biotique Global Normalisé (IBGN). Association française de normalisation.
- Antoine S.E. & Benson-Evans K. (1984) Teratological variations in the River Wye diatom flora, Wales, UK. *In* Ricard, M. (ed) Proceedings of the 8th International Diatom Symposium, Paris, p59-66.
- Blanc L. (2005) Impact de pressions polluantes sur le fonctionnement de communautés microbiennes aquatiques. Application à un bassin versant rural sous influence viticole. Mémoire Master 2, U. Blaise Pascal Clermont Ferrand II – Cemagref Lyon, 48pp.
- Circulaire DE/MAGE/BEMA 07/n°4 (2007) Protocole de prélèvement et de traitement des échantillons des invertébrés sur le réseau de contrôle de surveillance. Bulletin officiel du 11 avril 2007.
- Cedrat Développement, 1999, Etude morphologique du bassin du Vistre. Phase 1 et 2 : état des lieux et diagnostic, Agence de l'Eau RM & C, Ref, 2H1206, 90 p. + annexes
- Cedrat Développement, 2000, Etude morphologique du bassin du Vistre, Phase 3 et 4 ; Définition des objectifs. Propositions d'orientations. Agence de l'Eau RM & C Ref 2H1206, 95p + annexes,
- Cedrat Développement, 2000, Projets pilotes de réhabilitation du Vistre, Agence de l'Eau RM & C, Ref 2H1316, Pièce 6 Rapport Annexe.
- Cemagref (1982) Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon A.F. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, 218p.
- Chrost (1990) Microbial ectoenzymes in aquatic environments. *In*: Overbeck, J. (Ed) : Aquatic Microbial Ecology, biochemical and molecular approach, Brock/Springer Series in Contemporary BioScience, 190p.
- Corcoll-Cornet N., 2006, Réponse de processus microbiens sédimentaires à un gradient de pollution en rivière. Master 2 INSA, ENTPE-Cemagref Lyon, 64p.
- Coste M., Boutry S., Tison-Rosebery J., Delmas F. (2009) Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators* 9(4):621-650.
- Denys L. (1991) A check-list of the diatoms in the Holocene deposits of the Western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. Ministère des Affaires Economiques – Service Géologique de Belgique. Prof. paper 246, 41p.
- Dolédec S. & Chessel D. (1994) Co-inertia analysis: an alternative method for studying species - environment relationships. *Freshwater Biology* 31: 277-294.
- Falasco E., Bona F., Badino G., Hoffmann L. & Ector L. (2009) Diatom teratological forms and environmental alterations: a review. *Hydrobiologia* 623: 1-35.
- Fechner L., 2010, Acquisition de tolérance et modification de structure des communautés périphtiques : une réponse précoce à la pression urbaine dans les milieux aquatiques, Doctorat Université Paris Est, 14/12/2010, 362p.
- Hillebrand H., Dürselen C.D., Kirschtel D., Pollinger U. & Zohary T. (1999) Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* 35(2):403-424.
- Krammer K & Lange-Bertalot H. (1986-1991) Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae. 876 p.; 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, 596 p.; 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, 576 p.; 4. Teil: Achnanthaceae. *Kritische Ergänzungen zu*

- Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. 437 p. In: H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa.
- Lecointe C., Coste M. & Prygiel J. (1993) Omnidia – Software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories Management. *Hydrobiologia* 269/270: 509-513.
- MEED & Agences de l'eau (2003) Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau des cours d'eau : rapport de présentation SEQ-Eau version 2.
- Pielou E. C. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collection. *Journal of Theoretical Biology* 13: 131-144.
- Ricart M., Guasch H., Barceló D., Brix R., Conceição M.H., Geiszinger A., López de Alda M.J. , López-Doval JC., Muñoz I., Postigo C., Romaní AM., Villagrasa M. & Sabater S. (2010) Primary and complex stressors in polluted mediterranean rivers: pesticide effects on biological communities. *Journal of Hydrology*, 383: 52-61.
- Shannon C. E. & Weaver W. (1963) *The mathematical theory of communication*. University Illinois Press, Urbana.
- Tachet H., Richoux P., Bournaud M. & Usseglio-Polatera P. (2000) Invertébrés d'eau douce. Systématique, biologie, écologie. CNRS EDITIONS, Paris.
- Tlili A. (2010) Signification écologique de la tolérance acquise des communautés microbiennes des biofilms de rivières à une contamination d'origine anthropique, Université Claude Bernard Lyon I, 21/12/2010, 332p
- Usseglio-Polatera P., Richoux P., Bournaud M. & Tachet H. (2001) A functional classification of benthic macroinvertebrates based on biological and ecological traits: application to river condition assessment and stream management. *Archiv für Hydrobiologie* 139: 53-83.
- Wetzel R.G. & Likens G.E. (1991) *Limnological Analyses*. Springer Verlag, New York, 386p.

Annexes

Annexe 1 - Granulométrie des sédiments	76
Annexe 2 - Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques mesurés.	77
Annexe 3 - Tableaux des traits biologiques et écologiques	78
Annexe 4 - Valeurs des différents paramètres physico-chimiques mesurés sur le Vistre (7 campagnes). Le code couleur correspond aux classes de qualité du SEQ-Eau (MEED & Agences de l'eau, 2003). Rouge : classe de qualité 'Mauvaise' ; Orange : classe de qualité 'Médiocre' ; Jaune : classe de qualité 'Moyenne' ; Vert : classe de qualité 'Bonne' et Bleu : classe de qualité 'Très bonne'. Na : Non analysé.	79
Annexe 5 - Valeur des notes IBGN.....	80
Annexe 6 - Profils bioécologiques	81

Annexe 1 - Granulométrie des sédiments

		2000 < > 500 µm	500 < > 200 µm	200 < > 50 µm	< 50 µm
sept-08	HB1	1,80	2,60	24,90	70,70
	HB3	3,34	6,68	35,90	54,08
	HB5	1,52	3,56	32,66	62,26
	HB7	1,81	4,67	34,98	58,54
	HB9	1,37	4,33	27,70	66,60
	HB1	0,00	0,00	0,00	100,00
	HB3	—	—	—	—
juil-09	HB5	—	—	—	—
	HB7	2,86	7,66	21,59	67,89
	HB9	56,76	22,12	7,19	13,93
	HB1	14,66	16,98	24,64	43,72
	HB3	6,68	3,99	27,55	61,78
sept-09	HB5	5,83	15,13	30,81	48,23
	HB7	7,34	12,31	16,81	63,54
	HB9	17,20	22,48	31,28	29,04
	HB1	12,15	17,97	19,00	50,88
	HB3	15,68	14,49	26,59	43,24
nov-09	HB5	5,33	13,28	35,95	45,44
	HB7	1,99	3,76	21,79	72,46
	HB9	13,94	22,33	38,18	25,55

:

Annexe 2 - Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques mesurés.

	pH	Conductivité	COD	NH4	NO2	NO3	Ptot	PO4	HCO3	Cl	SO42	Ca2	Mg2	Na	K	O2
pH	1	-0,93	-0,05	-0,10	-0,13	0,01	-0,09	-0,08	0,10	-0,03	0,09	0,05	0,17	0,03	-0,04	0,06
Conductivité	-0,93	1	0,22	0,21	0,10	-0,17	0,06	0,17	-0,08	0,32	0,05	-0,15	-0,04	0,26	0,26	-0,18
COD	-0,05	0,22	1	0,58	0,33	-0,74	0,47	0,65	-0,57	0,79	0,06	-0,69	0,46	0,73	0,81	-0,71
NH4	-0,10	0,21	0,58	1	0,23	-0,56	0,43	0,76	-0,14	0,43	-0,42	-0,68	0,09	0,46	0,61	-0,56
NO2	-0,13	0,10	0,33	0,23	1	0,01	0,30	0,33	-0,22	0,07	0,02	-0,23	0,03	0,06	0,20	-0,26
NO3	0,01	-0,17	-0,74	-0,56	0,01	1	-0,51	-0,75	0,65	-0,84	0,35	0,83	-0,19	-0,83	-0,87	0,74
Ptot	-0,09	0,06	0,47	0,43	0,30	-0,51	1	0,83	-0,54	0,37	-0,32	-0,55	0,18	0,38	0,56	-0,55
PO4	-0,08	0,17	0,65	0,76	0,33	-0,75	0,83	1	-0,52	0,63	-0,37	-0,80	0,22	0,65	0,83	-0,70
HCO3	0,10	-0,08	-0,57	-0,14	-0,22	0,65	-0,54	-0,52	1	-0,58	0,31	0,73	0,00	-0,55	-0,65	0,57
Cl	-0,03	0,32	0,79	0,43	0,07	-0,84	0,37	0,63	-0,58	1	0,06	-0,69	0,35	0,96	0,92	-0,66
SO42	0,09	0,05	0,06	-0,42	0,02	0,35	-0,32	-0,37	0,31	0,06	1	0,49	0,56	0,02	-0,11	0,21
Ca2	0,05	-0,15	-0,69	-0,68	-0,23	0,83	-0,55	-0,80	0,73	-0,69	0,49	1	0,02	-0,71	-0,84	0,75
Mg2	0,17	-0,04	0,46	0,09	0,03	-0,19	0,18	0,22	0,00	0,35	0,56	0,02	1	0,28	0,32	-0,15
Na	0,03	0,26	0,73	0,46	0,06	-0,83	0,38	0,65	-0,55	0,96	0,02	-0,71	0,28	1	0,91	-0,65
K	-0,04	0,26	0,81	0,61	0,20	-0,87	0,56	0,83	-0,65	0,92	-0,11	-0,84	0,32	0,91	1	-1
O2	0,06	-0,18	-0,71	-0,56	-0,26	0,74	-0,55	-0,70	0,57	-0,66	0,21	0,75	-0,15	-0,65	-0,74	1,00

Annexe 3 - Tableaux des traits biologiques et écologiques

Traits biologiques	Modalités	Traits écologiques	Modalités
Taille maximale	<= .25 cm	Distribution transversale	river channel
	> .25-.5 cm		banks, connected side-arms
	> .5-1 cm		ponds, pools, disconnected side-arms
	> 1-2 cm		marshes, peat bogs
	> 2-4 cm		temporary waters
	> 4-8 cm		lakes
	> 8 cm		groundwaters
Durée du cycle vital	? 1 year	Distribution longitudinale	crenon
	> 1 year		epirithron
Nombre de générations/an	< 1		metarhithron
	1		hyporhithron
Stades aquatiques	> 1		epipotamon
	egg		metapotamon
	larva		estuary
	nymph		outside river system
Technique de Reproduction	adult	Altitude	lowlands (< 1000 m)
	ovoviviparity		piedmont level (1000 - 2000 m)
	isolated eggs, free		alpine level (> 2000 m)
	isolated eggs, cemented	Zones biogéographiques	2 : Pyrenees
	clutches, cemented or fixed		4 : Alps
	clutches, free		8 : Vosges, Jura, Massif Central
	clutches, in vegetation		13a : lowlands (oceanic)
	clutches, terrestrial		13b : lowlands (mediterranean)
	asexual reproduction	Substrat	cobbles/pebbles
Dispersion	aquatic passive		gravel
	aquatic active		sand
	aerial passive		silt
	aerial active		macrophytes
Formes de résistance	eggs, statoblasts		microphytes
	cocoons		twigs/roots
	housings against desiccation		organic detritus/litter
	diapause or dormancy		mud
	none	Vitesse du courant	null
Respiration	tegument		slow (< 25cm/s)
	gill		medium (25-50 cm/s)
	plastron		fast (> 50 cm/s)
	aerial	Statut trophique	oligotrophic
Relation au substrat	flier		mesotrophic
	surface swimmer		eutrophic
	full water swimmer	Salinité	fresh water
	crawler		brackish water
	burrower (epibenthic)	Température	psychrophilic (<15°C)
	interstitial (endobenthic)		thermophilic (>15°C)
	temporary attached		eurythermic
	permanent attached	Valeur saprobiale	xenosaprobic
Nourriture	fine sediment + microorganisms		oligosaprobic
	detritus < 1mm		b-mesosaprobic
	dead plant > 1mm		a-mesosaprobic
	living microphytes		polysaprobic
	living macrophytes		
	dead animal > 1mm		
	living microinvertebrates		
	living macroinvertebrates		
	vertebrates		
Mode d'alimentation	absorber		
	deposit feeder		
	shredder		
	scraper		
	filter-feeder		

Annexe 4 - Valeurs des différents paramètres physico-chimiques mesurés sur le Vistre (7 campagnes). Le code couleur correspond aux classes de qualité du SEQ-Eau (MEED & Agences de l'eau, 2003). Rouge : classe de qualité 'Mauvaise' ; Orange : classe de qualité 'Médiocre' ; Jaune : classe de qualité 'Moyenne' ; Vert : classe de qualité 'Bonne' et Bleu : classe de qualité 'Très bonne'. Na : Non analysé.

		pH	Conductivité μS/cm	COD mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	P _{tot} mg/L	PO ₄ ²⁺ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Température °C	O ₂ mg/L
HB1	sept-08	7,7	915	5	1,65	0,25	5,7	1,6	4,65	285	96	86	125	7,3	64	11	24,7	6,9
	fev-09	7,9	810	3,4	0,08	0,37	32	na	0,46	325	40	89	153	7,4	19,5	1,6	10	11,76
	avr-09	7,7	800	3,75	0,08	0,13	19	0,74	0,74	325	42	na	157	7,6	22	2	16,6	11,94
	juil-09	8	865	5	2,55	0,46	12	1,25	3,3	315	73	86	129	8	46	7,8	23,1	8,5
	sept-09	7,8	810	4,95	0,89	0,24	9,9	0,82	2,35	270	70	83	117	7,3	44	8,8	20,7	9,63
	nov-09	7,7	910	5,7	1,85	0,28	17	0,65	1,9	315	77	90	135	7,8	50,5	10	12,7	9,37
	avr-10	8	800	2,25	0,48	0,21	23	0,21	0,5	330	40	81	140	6,6	24	2,1	11,8	10,79
Rejet	sept-08	7,7	895	5	6,65	0,35	1	3,6	11,3	260	102	79	101	7,6	70,5	16,5	25,5	9,3
	fev-09	7,8	820	7,3	2,45	1,65	11	na	6,65	260	79	85	115	7,5	48	9,7	na	na
	avr-09	7,5	770	5,7	0,27	0,2	5	9,95	9,95	240	76	na	113	7,6	48,5	10,5	na	na
	juil-09	7,7	964	7,15	14,3	0,5	1	5,1	13,7	330	93	85	98	8,2	66	15	25,2	4,9
	sept-09	7,6	830	6,8	3,35	0,2	3,5	1,4	4,3	245	82	84	101	7	55	11,5	23,3	5,8
	nov-09	7,6	900	7,6	15	0,23	1	2,55	7,45	295	90	77	101	7,4	58,5	11,5	15,9	6,74
	avr-10	7,9	860	5,7	4,45	0,12	1	1,4	3,95	290	79	79	103	6,4	49	7,8	14,6	7,46
HB2	sept-08	8,1	945	5	0,1	0,04	7,9	0,86	2,45	305	97	87	138	7,3	62,5	9	24,3	6,5
	fev-09	7,9	805	3,25	0,11	0,34	32	na	0,38	325	40	89	155	7,4	19,5	1,6	10,6	11,77
	avr-09	7,7	800	3,7	0,06	0,12	20	0,64	0,64	330	41	na	159	7,7	21,5	1,8	17,3	13,16
	juil-09	8,2	843	4,5	0,05	0,09	14	0,57	1,7	315	71	87	135	8	43	5,9	22,9	9,85
	sept-09	7,9	810	4,5	0,04	0,09	12	0,59	1,75	275	68	83	124	7,5	39,5	6,1	19,8	10,63
	nov-09	7,7	910	5,5	0,28	0,29	19	0,4	1,15	315	75	92	142	7,9	46	6,9	12,2	10,47
	avr-10	8,1	800	2,15	0,09	0,21	24	0,17	0,41	325	40	81	142	6,6	19	1,8	11,9	11,3
HB5	sept-08	8,1	950	5	0,1	0,04	8,2	0,89	2,6	310	98	88	140	7,4	62,5	8,8	24,2	12,9
	fev-09	7,9	810	3,25	0,47	0,36	32	na	0,39	330	40	89	155	7,5	20	2,3	8,1	10,46
	avr-09	7,8	800	3,8	0,03	0,12	20	0,6	0,6	335	41	na	159	7,7	21,5	1,9	18,2	12,85
	juil-09	7,9	853	4,6	0,05	0,06	14	0,64	1,9	315	65	87	136	8	45,5	6,3	22,2	10,1
	sept-09	7,9	850	4,6	0,04	0,11	12	0,73	2,15	275	76	85	126	7,7	45	6,9	19,2	9,16
	nov-09	7,7	905	5,3	0,39	0,31	19	0,41	1,15	315	74	90	140	7,8	45,5	6,8	11,8	10,41
	avr-10	8,1	805	2,1	0,1	0,23	24	0,19	0,42	330	40	82	142	6,6	19,5	2,2	12,4	12,06
HB7	sept-08	8,23	852	4,55	0,05	0,06	13	0,67	1,9	315	73	87	136	8	44,5	6,3	22,5	10,6
	fev-09	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
	avr-09	7,7	750	3,8	0,16	0,19	21	0,24	0,53	na	na	na	na	na	na	na	na	na
	juil-09	7,8	790	4,45	0,05	0,06	13	0,67	1,9	na	na	na	na	na	na	na	na	na
	sept-09	7,9	860	4,8	0,09	0,14	12	0,78	2,25	280	78	86	126	7,7	47	7,4	19,6	9,32
	nov-09	7,8	900	5,6	0,26	0,29	19	0,41	1,1	310	75	89	139	7,7	46	6,8	11,8	10,6
	avr-10	8,2	800	2,2	0,09	0,22	24	0,16	0,38	330	40	81	141	6,6	19,5	1,7	12,6	12,07
HB9	sept-08	7,9	940	5	0,1	0,07	8,2	0,8	2,35	305	93	87	138	7,7	60,5	8,6	24,7	6,9
	fev-09	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
	avr-09	7,7	750	4,15	0,09	0,18	21	0,29	0,64	310	35	na	139	7,4	17,5	1,6	15,5	10
	juil-09	8,3	847	4,8	0,05	0,07	13	0,67	1,9	310	73	88	132	8	45,5	6,6	24,7	10,8
	sept-09	7,9	865	5,1	0,8	0,2	11	0,8	2,4	290	77	87	126	7,8	47	7,8	21,2	8,31
	nov-09	7,8	890	5,8	0,13	0,26	20	0,35	0,98	305	76	87	136	7,5	47	6,7	12,4	11,3
	avr-10	8,2	800	2,2	0,1	0,22	24	0,19	0,45	320	40	84	141	6,6	47	1,6	12,9	12,25

Annexe 5 - Valeur des notes IBGN

Note IBGN calculée sur les listes faunistiques de chaque station aux différentes dates de prélèvement. Le chiffre entre parenthèses et en italique correspond au groupe faunistique indicateur (GFI). Le fond de couleur correspond aux classes de qualité (orange : qualité ‘médiocre’ ; jaune : qualité ‘moyenne’ ; vert : qualité ‘bonne’).

	HB1	HB2	HB3	HB4	HB5	HB6	HB7	HB8	HB9
sept-08	11 (5)	11 (3)	10 (3)	13 (5)	12 (5)	9 (2)	13 (5)	8 (2)	9 (2)
févr-09	13 (5)	12 (5)	12 (2)	13 (5)	13 (5)	14 (5)	14 (5)	14 (5)	14 (5)
mai-09	8 (2)	11 (5)	8 (2)	9 (3)	11 (5)	13 (5)	12 (5)	13 (5)	13 (5)
juil-09	12 (5)	12 (5)	12 (5)	13 (5)	11 (5)	8 (2)	14 (5)	14 (5)	12 (5)
sept-09	13 (5)	12 (5)	12 (5)	12 (5)	13 (5)	8 (2)	13 (5)	9 (2)	11 (5)

Distribution des fréquences relatives moyennes des modalités (sous forme d'histogramme) pour 3 traits biologiques et 3 traits écologiques choisis, pour les 9 stations du profil longitudinal du Vistre à Bouillargues. Les histogrammes rayés marron représentent la station HB1, restaurée mais en aval de la STEP, les vagues bleues représentent les stations restaurées et les points rouges, les stations témoins de sites non restaurés.

