



Les résultats précédents ont permis de démontrer que l'échantillonnage de la macrofaune pouvait être limité aux substrats minéraux collectés sur une seule UG seuil, indépendamment de sa position dans une succession locale de seuils . Dans ce chapitre, nous avons cherché à affiner, puis à simplifier le protocole mis en place. Pour cela nous nous sommes proposée : 1) de déterminer le nombre nécessaire d'échantillons permettant d'obtenir des résultats représentatifs de la macrofaune, avec une attention particulière pour les taxons polluo-sensibles ; 2) de comparer ce protocole avec l'une des méthodes multi-substrats utilisées en routine dans certains pays, afin de tester sa représentativité avec, là encore, une attention particulière pour les taxons polluo-sensibles ; 3) de tester la robustesse du protocole d'échantillonnage ainsi affiné, sur un linéaire de cours d'eau ; 4) d'examiner la possibilité de réduire l'étude des macroinvertébrés aux Ordres taxonomiques les plus polluo-sensibles ; 5) de modéliser la distribution de la macrofaune benthique dans la perspective d'établir un référentiel du bon état écologique de la Loire amont en se fondant pour l'essentiel sur les taxons les plus polluo-sensibles.

Dans un souci de simplification, nous avons appelé MMS-GUR (Beauger et Lair, 2008), le protocole proposé pour collecter les macroinvertébrés sur les substrats minéraux des seuils, en abréviation de « Macroinvertibrates living in the Mineral Substrates of the Geomorphological Unit Riffle ».

La démarche de validation des objectifs est la suivante :

a) Rechercher le nombre nécessaire et suffisant d'échantillons.

En prenant en compte un grand nombre d'échantillons, cette première étude a pour objectif de définir le nombre d'échantillons à collecter sur un seuil. L'étude a été menée au printemps de l'année 2003 sur le seuil amont du site atelier Allier et en été sur les 3 seuils successifs de ce même site.

b) Comparer avec une méthode multi-substrats.

En travaillant sur différents sites d'étude, il s'agit de tester si le protocole ainsi défini, comparativement à une méthode multi-substrats de type IBGN, entraîne une perte d'information taxonomique en particulier pour les taxons polluo-sensibles. L'étude a été réalisée sur le site atelier Allier et sur les stations 5 et 6 du fleuve Loire.

c) Tester la robustesse du protocole MMS-GUR sur un linéaire de rivière.

Cette analyse se subdivise en deux parties : i) exploitation des variables physico-chimiques (données Agence de l'Eau Loire-Bretagne) ; ii) analyse de la macrofaune. En changeant d'échelle, l'analyse portant sur un linéaire de cours d'eau permet de tester si le protocole est apte à identifier les changements faunistiques qui se produisent nécessairement sur un linéaire. L'analyse a été étendue à 8 stations de la Loire amont, situées sur un secteur de 150 km, allant de l'épirhithron à l'épipotamon.

d) Réduire l'analyse à certains groupes faunistiques dans le but de réduire le temps de travail.

Nous avons poursuivi l'analyse avec les 3 Ordres les plus polluo-sensibles (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères : EPT), ainsi qu'avec les genres appartenant à l'Ordre des Coléoptères {certains auteurs ayant montré la sensibilité spécifique de cet Ordre (Compin & Céréghino, 2003)}. L'ensemble, désigné par EPTC, puis les EPT ont été comparés avec la macrofaune benthique (considérée dans sa globalité), de manière à juger de leur aptitude à discriminer la zonation longitudinale. La Loire amont, retenue ci-dessus, était toute désignée pour servir de base à cette étude.

e) Créer une typologie de référence du linéaire de rivière.

La distribution des taxons collectés sur le linéaire de la Loire, avec une attention particulière pour les plus polluo-sensibles, a été comparée avec une typologie théorique établie à partir de travaux antérieurs réalisés sur cette partie du fleuve. Ces études ont désigné les peuplements macrobenthiques de référence en fonction de leur position sur le *continuum* (Ivol *et al.*, 1997 ; Ivol-Rigaut, 1998), et elles ont permis de valider nos observations et par conséquent, le protocole d'échantillonnage.

f) Modéliser la distribution des taxons.

En considérant les études antérieures, les peuplements de macroinvertébrés étant très diversifiés, nous avons modélisé la distribution des taxons, avec une attention particulière pour les EPT, afin de créer un état de référence du linéaire de la Loire étudié.

## I. Optimisation du nombre d'échantillons à collecter

L'étude a porté successivement sur les résultats obtenus sur le seuil 1 du site atelier Allier, largement échantillonné au printemps, et sur les trois seuils successifs en été (cf. chapitre 2). Au cours de ce travail, 17 échantillons ont été collectés sur le seuil 1 au printemps et respectivement, 17, 16 et 15 échantillons sur les seuils 1, 2 et 3 en été (rappelons que la plupart de ces échantillons correspondent à des triplicats).

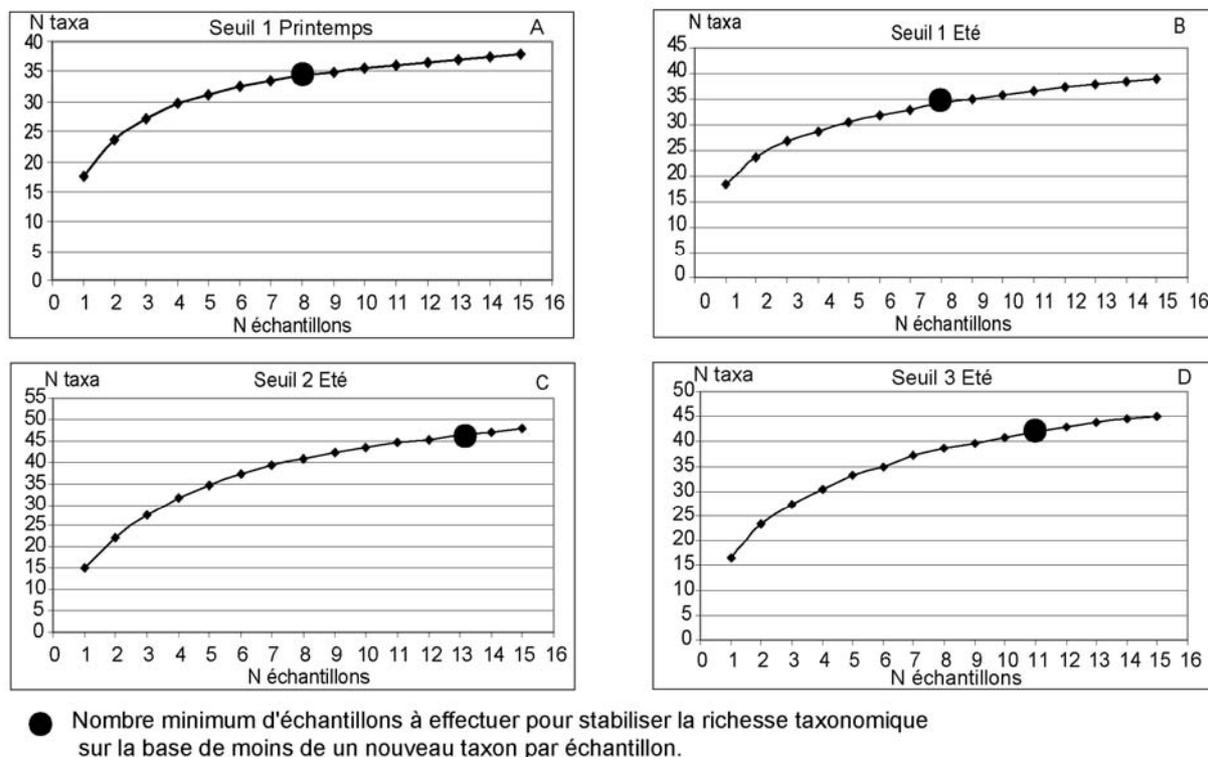
L'analyse a permis l'établissement des courbes de richesses cumulées (obtenues avec un minimum de 3 individus par nouveau genre), de manière à visualiser l'infléchissement de la courbe sur le critère de « moins de un nouveau taxon par échantillon ». Cette analyse a été réalisée sur une base commune de 15 échantillons pour chaque saison et pour chaque seuil, permettant de créer un total de 60 combinaisons d'échantillons pour les seuils 1 et 2 (les 15 échantillons recueillis au seuil 3, n'autorisant pas à procéder à des combinaisons). La forme des courbes de richesses cumulées est similaire quel que soit le seuil considéré, mais le nombre d'échantillons requis pour obtenir une richesse taxonomique représentative du peuplement de macroinvertébrés benthiques varie en fonction de la saison et du seuil (Fig. 28). En effet, au printemps, pour le seuil 1, le nombre nécessaire d'échantillons pour stabiliser la richesse taxonomique est de 8 ( $8 \pm 0,6$ ). En été, la stabilisation de la richesse est obtenue avec 8 échantillons ( $8 \pm 1,3$ ) pour le seuil 1, avec 13 échantillons ( $13 \pm 0,7$ ) pour le seuil 2, et enfin avec 11 échantillons pour le seuil 3. La moyenne de ces résultats est de 10 échantillons.

**A l'examen des courbes de richesse cumulée réalisées sur le site atelier Allier (sur la base de moins de 1 nouveau taxon par échantillon), il apparaît que le nombre d'échantillons nécessaire et suffisant est de 13.**

## II. Comparaison du protocole d'échantillonnage avec une méthode multi-substrats

Comme nous l'avions souligné au chapitre 1, de nombreuses méthodes d'échantillonnage sont utilisées en routine pour collecter les macroinvertébrés (BMWP, RIVPACS, BMBM, etc.). Les techniques multi-substrats tendent à obtenir une image fidèle de la diversité biologique des milieux étudiés. Cependant, certains de ces habitats ne sont ni structurels ni pérennes (*i.e.* macrophytes) et d'autres couvrent de très petites surfaces peu représentatives de la station d'étude. Si de tels habitats font la spécificité d'une station voire d'une rivière, ils biaisent les comparaisons entre stations et / ou

entre cours d'eau en n'étant pas systématiquement présents. A cela s'ajoute la diversité des engins de prélèvement utilisés et la disparité des surfaces échantillonnées correspondantes (cf. chapitre 1 p. 23).



**Figure 28 : Courbes de richesse cumulée pour les trois seuils successifs du site atelier de la rivière Allier au printemps (A) et en été (B, C, D).**

Dans cette étude, menée sur le site atelier Allier au printemps 2003 et sur les stations 5 et 6 de la Loire en juin 2006, nous avons comparé les résultats obtenus entre le protocole MMS-GUR (pour lequel le nombre d'échantillons a été défini) et une méthode multi-substrats normalisée (désignée XS) (AFNor, 1992) en utilisant un engin de prélèvement et une surface échantillonnée identiques pour les deux méthodes.

Contrairement au protocole MMS-GUR, basé exclusivement sur l'échantillonnage des substrats minéraux des seuils, les échantillons prélevés avec la méthode XS {incluant les substrats minéraux et végétaux (macrophytes, bryophytes, litière, etc.)}, sont basés sur les couples vitesse d'écoulement / substrats. Le nombre d'échantillons est réduit à 8 et l'échantillonnage multi-substrats doit porter sur une zone de longueur correspondant à 10 fois la largeur. Le type de substrat collecté et le nombre d'échantillons sont présentés dans le Tableau 31.

**Tableau 31 : Nombre d'échantillons collectés sur les substrats du site atelier Allier et sur les deux stations de la Loire, pour chaque méthode d'échantillonnage (avec XS = méthode multi-substrats).**

	Allier - Site atelier		Loire - Station 5		Loire - Station 6	
	MMS-GUR	XS	MMS-GUR	XS	MMS-GUR	XS
Sable	1	1	2	1		1
< 16 mm			1			
[16-32[ mm	2	1	2	2		2
[32-64[ mm	3	1	1		4	
[64-128[ mm	6	2	2	3	5	3
[128-256[ mm	1	1	3		3	
≥ 256 mm			2	1	1	1
Macrophytes		1		1		
Litière		1				
Vase						1

Si l'on se réfère aux résultats présentés ci-après (Tableaux 32, 33 et 34), des différences notables en termes de richesse apparaissent d'un site à l'autre. A la station 5 de la Loire, en prenant indifféremment 10 ou 13 échantillons (protocole MMS-GUR), la richesse taxonomique est supérieure à celle obtenue avec les 8 échantillons de la méthode XS. Inversement, sur l'ensemble du site atelier Allier et sur la station 6 de la Loire, la richesse taxonomique est plus forte avec la méthode XS.

Avec la méthode multi-substrats, la collecte étendue à la vase, aux macrophytes et à la litière (exigeantes en durée de tri) favorise la capture de nombreux taxons polluo-tolérants (*Pisidium*, *Bythiospeum*, etc.), ce qui augmente la richesse taxonomique totale, sans apporter d'information sur la qualité de l'eau. Par contre, si l'on se réfère aux groupes indicateurs, des Perlidae sont présents sur la station 5 Loire et des Brachycentridae sur le site atelier Allier et sur la station 6 Loire. Ceci signifie que – contrairement aux différences de richesse taxonomique observées à certaines stations - ces groupes sont similaires quelle que soit la méthode utilisée. La richesse taxonomique étant essentiellement liée à la diversité des substrats (reflet de la capacité biogène du milieu), notre attention a porté sur les taxons polluo-sensibles qui sont impliqués dans l'établissement de la qualité de l'eau.

L'examen des taxons polluo-sensibles permet de faire le constat suivant : sur le site atelier, plusieurs individus de *Mystacides* et de *C. lepida* ont été échantillonnés avec le protocole MMS-GUR, alors qu'un seul individu de *Lepidostoma hirtum* et de *Halesus* ont été prélevés avec la méthode multi-substrats (la méthode MMS-GUR est donc plus efficace). Sur la Loire, le protocole MMS-GUR est plus efficace sur une des deux stations testées, tout en donnant des résultats de qualité comparable dans le second cas : ainsi, à la station 5, le protocole MMS-GUR permet sans conteste d'obtenir un plus grand nombre de taxons polluo-sensibles tels que *Arcynopteryx compacta* ou *Chimarra marginata* {en densité

significative (> 3 individus)} qu'avec l'autre méthode ; à la station 6, la majeure partie des taxons collectés sont polluo-tolérants, le taxon le plus polluo-sensible (*O. maculatum*) a été collecté avec les deux méthodes (avec un minimum de 20 individus pour les 13 échantillons), auquel s'est ajouté un unique individu de *Goera pilosa* prélevé avec la méthode XS. La méthode MMS-GUR a donc été plus efficace dans 2 cas sur 3.

**Tableau 32 : Groupe indicateur et richesse totale (niveau famille et genre) obtenus pour les deux méthodes d'échantillonnage appliquées sur l'Allier et la Loire.**

	Méthode d'échantillonnage	Groupe indicateur	Richesse totale (niveau taxonomique famille)	Richesse totale (niveau taxonomique genre)
Site atelier Allier	MMS-GUR : 8 échantillons	Brachycentridae	22	35
	MMS-GUR: 10 échantillons	Brachycentridae	23	37
	MMS-GUR : 13 échantillons	Brachycentridae	23	37
	XS : 8 échantillons	Brachycentridae	26	45
Station 5 Loire	MMS-GUR : 8 échantillons	Perlidae	31	46
	MMS-GUR: 10 échantillons	Perlidae	33	53
	MMS-GUR : 13 échantillons	Perlidae	34	55
	XS : 8 échantillons	Perlidae	34	52
Station 6 Loire	MMS-GUR : 8 échantillons	Brachycentridae	26	40
	MMS-GUR : 10 échantillons	Brachycentridae	27	41
	MMS-GUR : 13 échantillons	Brachycentridae	29	45
	XS : 8 échantillons	Brachycentridae	32	50

En retenant comme TBEP le « degré de trophie » et la « valeur saprobiale », les résultats obtenus par les deux méthodes d'échantillonnage (8, 10 ou 13 échantillons collectés avec le protocole MMS-GUR ou 8 avec la méthode multi-substrats) sont comparables (différence entre les modalités 1 à 6%). Cependant, comme l'on pouvait s'y attendre, davantage de taxons oligotrophes et xéno- oligosaprobés (en richesse et en densité) ont été collectés avec le protocole MMS-GUR qu'avec la méthode multi-substrats.

**A l'examen de ces résultats obtenus sur 3 secteurs, avec le protocole MMS-GUR il est clair que l'optimum est atteint quand on collecte 13 échantillons. Cependant, dans la zone la plus amont, 8 échantillons se sont avérés suffisants pour bio-évaluer correctement la qualité de l'eau. En revanche, dès que l'on se déplace le long du *continuum*, le nombre d'échantillons fixé à 8 ne suffit plus (les taxons polluo-sensibles diminuant au profit de taxons plus polluo-tolérants). Il n'en demeure pas moins que dans le secteur le plus aval, les résultats obtenus avec 10 échantillons sont demeurés proches de ceux obtenus avec 13 prélèvements. De façon générale, prélever 10 échantillons selon la méthode MMS-GUR (substrats minéraux des seuils) s'avère aussi efficace (voire plus efficace dans certains cas) que de prélever 8 échantillons avec la méthode XS. Elle permet en effet de collecter les taxons bio-indicateurs utilisés pour évaluer la qualité du milieu de manière analogue quelle que soit la station ou la rivière.**

**Tableau 33 : Présence/absence des taxons collectés respectivement avec chacune des méthodes d'échantillonnage sur la station 5 de la rivière Loire.**  
**Les taxons sont classés en fonction de leur polluo-sensibilité décroissante.**  
**( + : présence du taxon ; - : absence du taxon)**

	MMS-GUR (8 échantillons)	MMS-GUR (10 échantillons)	MMS-GUR (13 échantillons)	Multi-substrats (8 échantillons)
<i>Arcynopteryx compacta</i>	+	+	+	-
Autres Perlidae	-	+	+	-
<i>Chimarra marginata</i>	+	+	+	-
<i>Goera pilosa</i>	-	-	-	+
<i>Protonemura</i>	-	-	-	+
<i>Athripsodes</i>	+	+	+	-
<i>Mystacides</i>	-	-	-	+
<i>Setodes</i>	-	+	+	-
<i>Ophiogomphus</i>	-	+	+	-
Limnephilini	-	+	+	-
<i>Apheilocheirus aestivalis</i>	+	+	+	-
<i>Caenis</i>	-	-	-	+
<i>Micronecta</i>	-	-	-	+
<i>Gammarus</i>	+	-	+	-
<i>Dupophilus</i>	+	+	-	-
<i>Helophorus</i>	-	-	-	+
<i>Pseudocentropilum luteolum</i>	-	-	-	+
Tipulidae	-	-	-	+
<i>Atherix</i>	-	+	+	-
Hexatomini	-	+	+	-
<i>Liponeura</i>	+	+	+	-
Limoniini	-	+	+	-
Rhagionidae	-	+	+	-
<i>Pisidium</i>	-	-	-	+
<i>Bythiospeum</i>	-	-	-	+

**Tableau 34 : Présence/absence des taxons collectés respectivement avec chacune des méthodes d'échantillonnage sur la station 6 de la rivière Loire.**  
**Les taxons sont classés en fonction de leur polluo-sensibilité décroissante.**

	MMS-GUR (8 échantillons)	MMS-GUR (10 échantillons)	MMS-GUR (13 échantillons)	Multi-substrats (8 échantillons)
<i>Goera pilosa</i>	-	-	-	+
<i>Ephemera</i>	-	-	-	+
<i>Epeorus</i>	-	-	-	+
<i>Heptagenia</i>	-	-	-	+
<i>Oecetis</i>	-	-	+	-
<i>Mystacides</i>	-	-	-	+
<i>Setodes</i>	-	-	+	-
<i>Apheilocheirus aestivalis</i>	-	-	-	+
<i>Gomphus</i>	-	-	-	+
<i>Micronecta</i>	-	-	-	+
<i>Macronychus</i>	+	+	+	-
<i>Stenelmis</i>	-	+	+	-
<i>Hydraena</i>	-	-	+	-
<i>Blepharicera</i>	-	-	+	-
Empididae	+	+	+	-
<i>Dugesia</i>	+	+	+	-
<i>Piscicola geometra</i>	-	-	-	+
Asellidae	-	-	-	+
<i>Bythiospeum</i>	-	-	-	+
<i>Physa</i>	-	-	-	+

### III. **Efficienc e du protocole MMS-GUR pour évaluer la qualité de l'eau sur un linéaire de cours d'eau**

Rappelons que cette analyse a été conduite sur la Loire amont sur une distance de près de 150 km. Conformément aux résultats des chapitres 3 et 4, les stations ont été localisées sur des seuils pour lesquels l'expertise géomorphologique n'avait pas identifié d'impact anthropique induisant une perturbation physique sensible du milieu, de manière à pouvoir analyser la faune dans des conditions proches de l'état de référence hydromorphologique. Huit stations allant de l'épirhithron à l'épipotamon ont ainsi été échantillonnées. Les prélèvements ont été faits en septembre 2004, sur la base de 10 échantillons par seuil (valeur moyenne dérivée des résultats précédents, adoptée pour limiter notre temps de travail). L'hydrologie est demeurée stable durant toute la période d'échantillonnage (débits aux stations 1 à 3 =  $0,40 \pm 0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , à la station 4 =  $1,81 \pm 0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , à proximité de la station 5 =  $2,66 \pm 0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , à proximité des stations 6 & 7 =  $4,83 \pm 1,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et à la station 8 =  $9,73 \pm 1,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Cette étude a été conduite en deux phases : i) les caractéristiques physico-chimiques des points d'échantillonnage de l'eau de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ont tout d'abord été analysées afin d'évaluer la possible dégradation de la qualité de l'eau le long du linéaire étudié ; ii) ensuite, la distribution de la macrofaune benthique a été étudiée afin d'identifier les changements faunistiques d'amont en aval du linéaire, et finalement d'examiner la possibilité de réduire l'étude des macroinvertébrés aux Ordres taxonomiques les plus polluo-sensibles.

#### **A. *Caractéristiques physico-chimiques du linéaire Loire***

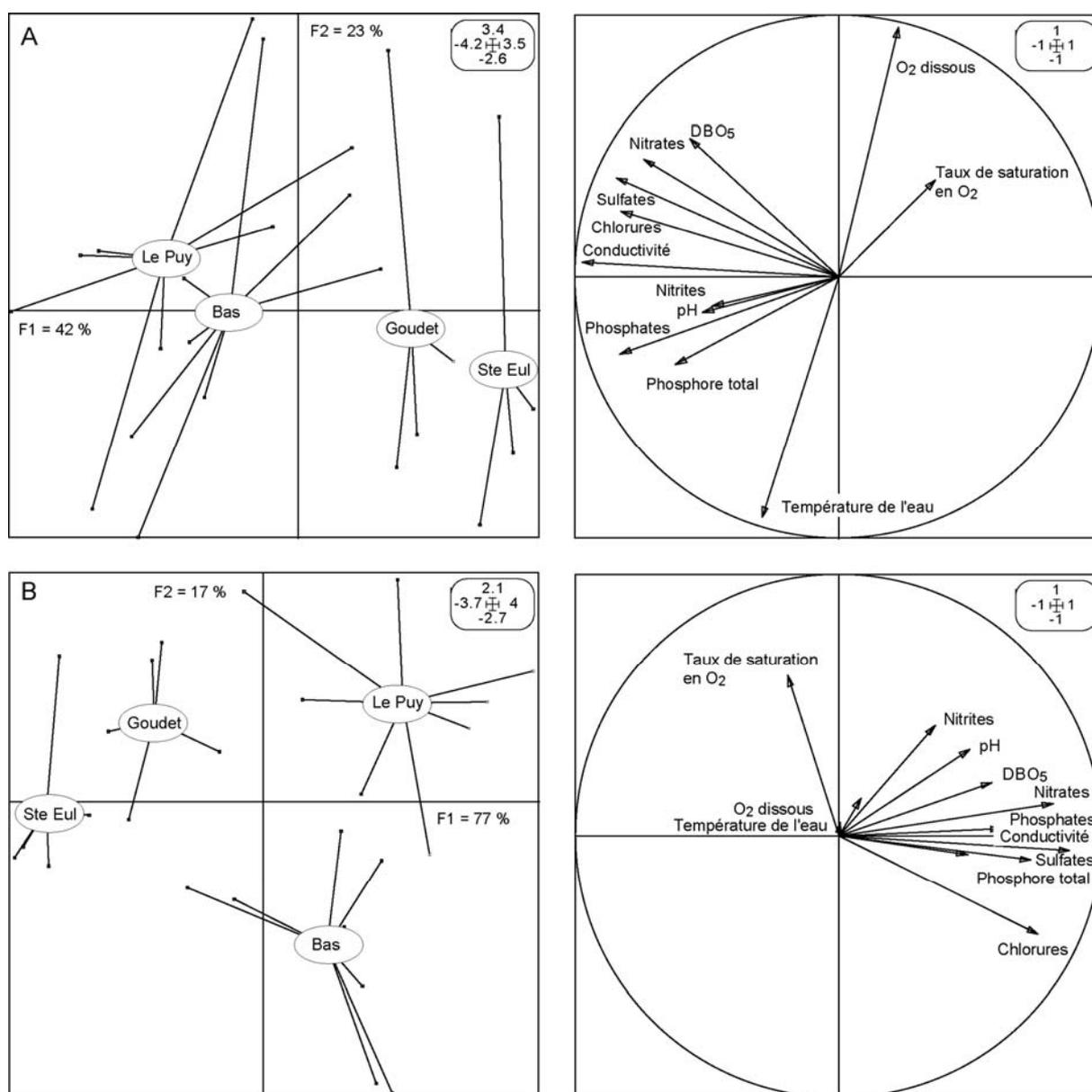
Afin de tester la variabilité physico-chimique entre les stations, nous disposons des données recueillies en 2004 sur 4 sites de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne comportant chacun de 6 à 8 campagnes de mesure. Le premier site est localisé à Ste Eulalie (à environ 1 km en amont de la station 1), le second à Goudet (au niveau de la station 4), le troisième au Puy-en-Velay (en amont de la station 6) et le quatrième à quelques kilomètres en amont de la station 8. Pour cette étude, une ACP simple associée à une analyse inter-groupes a été effectuée. Les variables retenues apparaissent sur la Figure 29.

L'analyse inter-stations indique que les différences physico-chimiques entre les stations sont significatives avec 42% de la variabilité totale (Tab. 35). Au regard des différentes variables, les sites de Ste Eulalie et de Goudet représentent la partie amont du linéaire bien oxygénée (Fig. 29 A et B). La

ville du Puy-en-Velay engendre clairement un impact (fortes concentrations entre nitrates, sulfates, etc.). Au niveau de la ville de Bas-en-Basset les résultats sont intermédiaires, suggérant à la fois le pouvoir auto-épurateur de la Loire et l'effet de dilution des apports du Lignon (Fig. 29 B).

**Tableau 35 : Synthèse des résultats des analyses inter-stations réalisées sur le linéaire de la Loire.**

Analyse inter-stations	Pourcentage de variabilité expliquée	Significativité $p < 0,05$
Variables physico-chimiques de l'Agence Loire-Bretagne	42	0
Variables faunistiques	39	0
EPTC	21	0
EPT	21	0,017



**Figure 29 : A : premier plan factoriel des variables et des centres d'inertie des relevés dans l'ACP initiale. B : premier plan factoriel des variables et des centres d'inertie des relevés dans l'analyse inter-stations. Ste Eul = Ste Eulalie ; Le Puy = Le Puy-en-Velay ; Bas = Bas-en-Basset.**

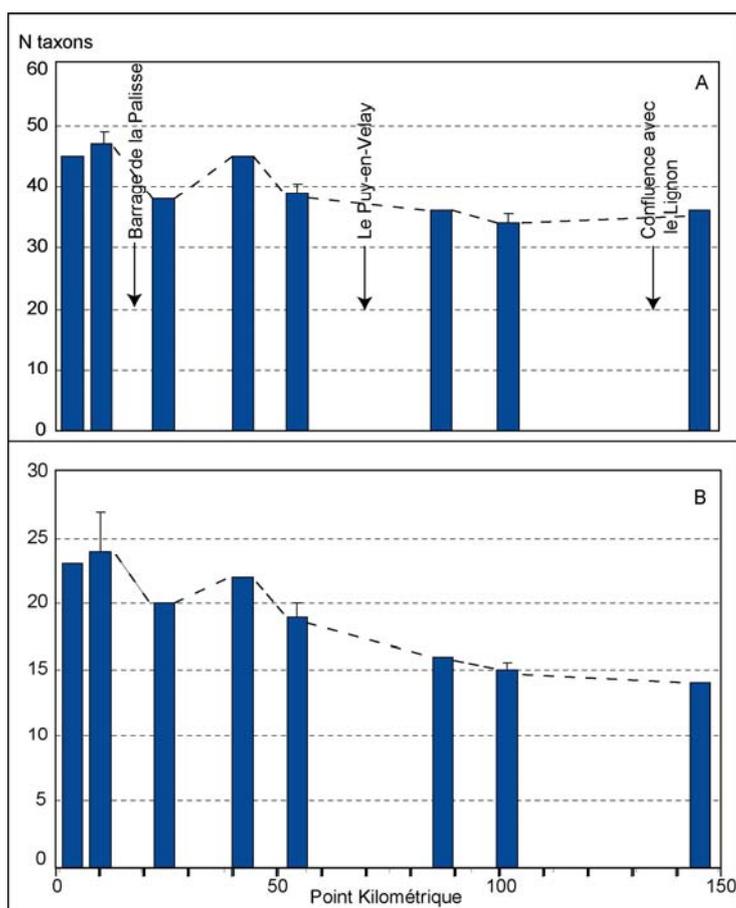
## **B. Evolution de la macrofaune benthique sur le continuum Loire**

L'analyse des variables physico-chimiques ayant montré des différences significatives entre les stations, nous avons recherché si la faune présentait des différences en termes de richesse totale, richesse en EPT et densité. Pour cette analyse concentrée sur l'évolution amont-aval, les données issues des groupes de trois seuils successifs ont été reprises sous forme d'écarts types et en considérant les taxons indicateurs présents.

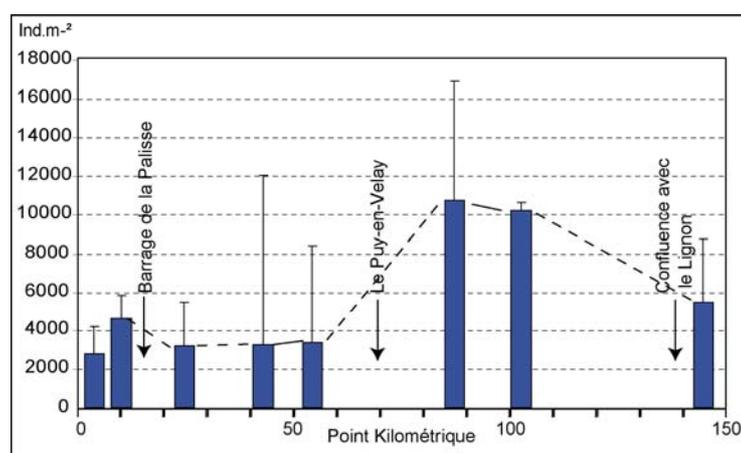
Nous constatons que la richesse taxonomique en macroinvertébrés (collectés sur les substrats minéraux des seuils) demeure relativement importante dans tout le secteur d'étude (Fig. 30 A). L'influence du barrage de La Palisse situé en amont de la station 3 peut être la cause de la diminution de la richesse observée à cet endroit. La richesse taxonomique totale paraît diminuer légèrement de l'amont vers l'aval, le test de Kruskal-Wallis indiquant cependant que les différences entre les stations ne sont pas significatives.

En revanche, il apparaît une perte de richesse générique en EPT, certains taxons polluo-sensibles disparaissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'amont (Fig. 30 B). Le test de Kruskal-Wallis effectué sur les richesses en EPT indique cette fois-ci que la différence est significative ( $p < 0,05$ ). Le figuré des écarts types des triplicats des seuils (stations 2, 5 & 7) confirme la faible disparité de la richesse en EPT, et ceci quel que soit le seuil étudié.

En liaison avec l'accroissement vers l'aval de la surface du bassin versant, le potentiel trophique s'exprime par la tendance à une augmentation de densité le long du *continuum* (Fig. 31). Les plus fortes valeurs mesurées aux stations 6 et 7 sont probablement liées aux effluents de la ville du Puy-en-Velay (située en amont de la station 6), leur atténuation à la station 8 pouvant être attribuée à l'effet de dilution des eaux du Lignon et/ou à l'autoépuration susceptible de s'exercer sur le parcours. Le figuré des écarts types des triplicats des densités mesurées sur les seuils (stations 2, 5 & 7) illustre, d'une part l'hétérogénéité de distribution des macroinvertébrés (phénomène classiquement observé pour les organismes vivants), d'autre part l'impact probable de la ville du Puy-en-Velay (particulièrement marqué à la station 6). Le test de Kruskal-Wallis indique que la différence entre les densités mesurées aux différentes stations est significative ( $p < 0,05$ ).



**Figure 30 : Richesse taxonomique totale (A) et richesse taxonomique en EPT (B) (moyenne  $\pm$  écart-type) des macroinvertébrés collectés aux différentes stations de la Loire positionnées en fonction de leur point kilométrique depuis la source.  
Les résultats des stations 2, 5 et 7, traités au chapitre 4 sont présentés avec les écarts-types correspondants.**



**Figure 31 : Densité (moyenne  $\pm$  écart-type) de la communauté de macroinvertébrés collectés aux différentes stations de la Loire positionnées en fonction de leur point kilométrique depuis la source.  
Les résultats des stations 2, 5 et 7, traités au chapitre 4 sont présentés avec les écarts-types correspondants.**

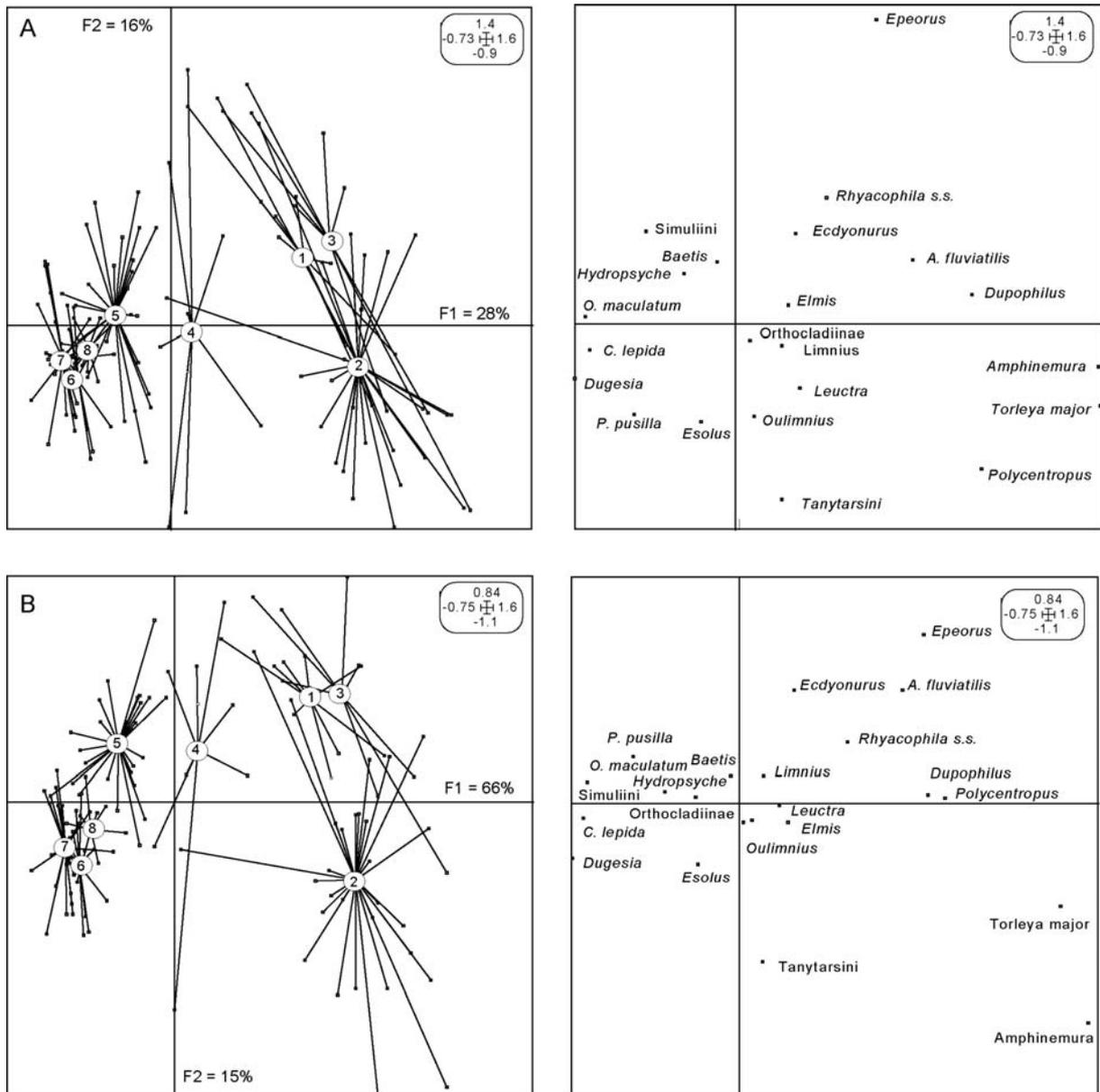
### C. **Caractéristiques de la distribution taxonomique sur le continuum Loire**

Le long du linéaire étudié, la distribution faunistique des macroinvertébrés benthiques (taxons présentant des abondances relatives > 1%) a été analysée à partir d'une AFC simple associée à une analyse inter-groupes afin de déterminer s'il existe une variabilité entre les stations. L'analyse inter-stations révèle que les différences taxonomiques sont significatives (avec 39% de la variabilité totale) (cf. Tab. 35). Les stations s'organisent selon un gradient amont-aval de distribution faunistique (Fig. 32), deux groupes (stations 1 à 3 & stations 5 à 8) s'opposant nettement sur le graphique, tandis que la station 4 se retrouve en position intermédiaire. Les taxons tels que *Leuctra*, *Polycentropus*, *Torleya major* ou encore *Amphinemura* sont caractéristiques de la zone amont (stations 1 à 4) alors que *O. maculatum*, *C. lepida*, *Hydropsyche* ou encore *Dugesia* représentent la partie aval du *continuum* (stations 5 à 8).

En passant ensuite de l'ensemble de la communauté macrobenthique aux genres d'EPTC puis aux genres d'EPT, nous avons testé l'efficacité de ces Ordres en tant qu'indicateurs afin d'examiner la possibilité de réduire l'étude à ces Ordres. Pour cela, une AFC simple associée à une analyse inter-groupes ont été réalisées. Les analyses inter-stations révèlent que les différences entre les stations sont significatives que l'on considère les EPTC ou les EPT (cf. Tab. 35), toutes deux regroupant 21% de la variabilité totale. Ces résultats permettent de réduire l'interprétation aux différents taxons des EPT sans perte d'information, d'autant que le schéma de distribution amont-aval des différentes stations demeure inchangé (Fig. 33).

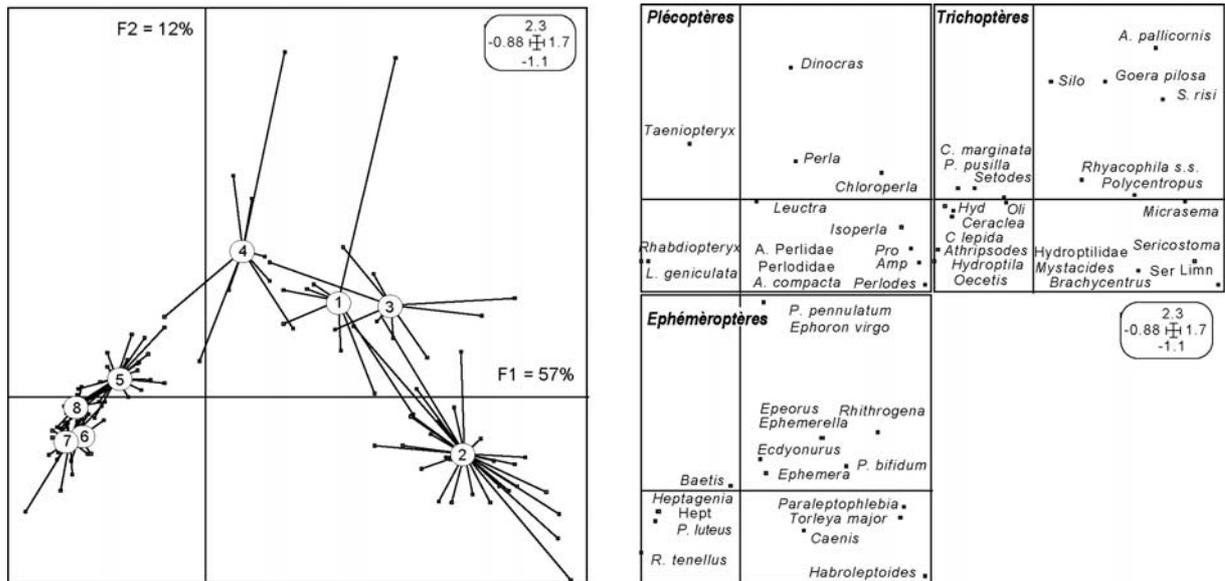
Si on ne considère que la distribution amont-aval des 14 **Plécoptères** collectés sur l'ensemble des seuils des différences apparaissent également. De la station 1 à 3, la richesse générique maximale est liée à la présence de taxons tels que *Isoperla*, *Chloroperla*, *Protonemura* et *Amphinemura*. De la station 4 à 5, la richesse générique liée à la présence de *Perla*, *Dinocras* et *Taeniopteryx* diminue. Plus en aval, la richesse générique est réduite à *Leuctra geniculata* et *Rhabdiopteryx*. Le genre *Leuctra* étant présent sur tout le linéaire, l'information fournie par la détermination à l'espèce s'est avérée nécessaire pour différencier les stations.

La distribution amont-aval des 22 **Trichoptères** montre que la richesse est élevée de la station 1 à la station 3, avec des taxons tels que *Micrasema*, *Brachycentrus*, *Mystacides*, *Allotrichia pallicornis*. Puis, la richesse générique chute aux stations 4 & 5, où se rencontrent des taxons tels que *Silo* et *C. marginata*. A partir de la station 6, ce sont des *C. lepida* ou encore *Oligopteryx maculatum* (typiques des zones intermédiaires des rivières, et sur lesquels nous reviendrons) qui ont été collectés. Des taxons tels que *Rhyacophila*, *Hydropsyche* et *P. pusilla* sont présents sans discontinuité d'amont en aval.



**Figure 32 : A : Premier plan factoriel des centres d'inertie des prélèvements réalisés sur les huit stations du fleuve Loire et des taxons dans l'AFC simple. B : Premier plan factoriel des centres d'inertie des prélèvements réalisés sur les huit stations et des taxons dans l'analyse inter-stations.**

La distribution amont-aval des 17 **Ephéméroptères** illustre également la baisse progressive de richesse d'amont en aval. De la station 1 à la station 4, ce sont les *Rhithrogena*, *Paraleptophlebia*, *Habroleptoides* ou encore *Procloëon bifidum* qui dominent, alors que des taxons tels que *Potamanthus luteus*, *Raptobaetopus tenellus* et *Heptagenia* etc. se retrouvent aux stations 5 à 8 où la richesse est plus faible. Seuls les *Baetis*, présents tout le long du linéaire, ne sont pas discriminants.



**Figure 33 : Premier plan factoriel des centres d'inertie des prélèvements réalisés sur les huit stations du fleuve Loire et des taxons réduits aux EPT dans l'analyse inter-stations (Amp = *Amphinemura* ; Pro = *Protonemura* ; Hyd = *Hydropsyche* ; Oli = *O. maculatum* ; Ser = *Sericostomatidae* ; Limn = *Limnephilidae* ; Hept = *Heptageniidae*)**

A l'examen de ces résultats, les macroinvertébrés collectés en suivant le protocole MMS-GUR permettent la même discrimination spatiale que les variables physico-chimiques issues de la base de données de l'Agence Loire-Bretagne. De plus, la possibilité de limiter le traitement de données aux taxons des Ordres EPT est mise en évidence.

#### IV. Distributions théorique et observée des EPT collectés sur le linéaire Loire

Le long du linéaire de la Loire, il est apparu que l'analyse faunistique pouvait être valablement limitée à l'étude des Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères. Nous avons voulu valider ce résultat en comparant les observations issues de la littérature à celles obtenues *in-situ*.

Pour cette étude, nous avons utilisé le recueil de données réalisé par Tachet *et al.* (2000) sur la distribution des macroinvertébrés benthiques le long de divers cours d'eau du territoire national. Celui-ci permet de relier la présence de l'ensemble des taxons à des traits biologiques, écologiques et physiologiques (TBEP) caractéristiques des divers lieux de collecte et des organismes correspondants. Partant de là, nous avons établi une typologie théorique permettant de connaître quels EPT devaient être potentiellement présents sur le secteur de Loire étudié, en fonction des TBEP établis par les auteurs (Tachet *et al.*, 2000 ; Usseglio-Polatera *et al.*, 2000b). Le but était d'obtenir l'ordre théorique de distribution des organismes le long du *continuum* fluvial. Parmi les 22 TBEP proposés par ces auteurs,

l'altitude, la distribution longitudinale, le degré de trophie, la valeur saprobiale, le substrat et la vitesse de l'écoulement, choisis pour leur aptitude à représenter l'environnement physique, ont servi de base à l'établissement de la typologie théorique du secteur de Loire étudié précédemment.

**L'Ordre des Plécoptères** {dans lequel 14 taxons (-2)<sup>1</sup> parmi les 20 (+2)<sup>2</sup> théoriques ont été collectés en Loire} permet à lui seul de caractériser le linéaire étudié, des taxons plus ubiquistes, tels *Leuctra*, étant présents d'amont en aval. Comme attendu le long du *continuum* de la Loire supérieure, la richesse générique qui est importante en amont, se réduit à quelques individus en aval et les trois zones différenciées précédemment se retrouvent (stations 1 à 3 - stations 4 & 5 - stations 6 à 8) (cf. Fig. 34).

Dans le descriptif ci-après, les genres figurés en gras appartiennent à la fois à la distribution théorique et à la distribution observée, les autres genres appartiennent à la distribution théorique, mais ne sont pas présents en Loire. Les genres comprenant une seule espèce figurent sous leur nom spécifique.

1) Du crénon à l'épirhithron, *Arcynopteryx compacta*, *Amphinemura*, *Chloroperla*, *Dinocras*, *Isoperla*, *Leuctra*, *Nemoura*, *Perla*, *Perlodes*, *Protonemura* et *Siphonoperla* vivent dans des eaux de montagne à tendance oligotrophe et oligosaprobe, dans des classes de vitesse variées et dans des substrats type macrophytes, blocs.... **Neuf** de ces taxons ont été collectés en amont (stations 1 à 3, cf. Fig. 33 et Fig. 34).

2) Du métarhithron à l'hyporhithron : *Brachyptera*, *Capnioneura*, *Chloroperla*, *Dinocras*, *Leuctra*, *L. geniculata*, *Nemoura*, *Perla*, *Perlodes*, *Rhabdiopteryx* et *Taeniopteryx* vivent dans des eaux de montagne à tendance oligo-mésotrophe et  $\beta$ -mésosaprobe, dans des classes de vitesse moyenne et dans des substrats plus fins de type pierres – galets. **Quatre** de ces taxons ont été collectés aux stations 4 et 5.

3) De l'épipotamon au métapotamon : *Besdolus imhoffi*, *Diura bicaudata*, *Isogenus nubecula*, *Leuctra*, *L. geniculata*, *Marthamea*, *Nemoura*, *Perla*, *Perlodes* et *Rhabdiopteryx* vivent dans des eaux de plaine à tendance mésotrophe et mésosaprobe, dans des classes de vitesse moyenne et dans des substrats type pierres – galets et graviers. **Trois** taxons de ce groupe ont été collectés en aval de la station 5.

---

<sup>1</sup> 12 taxons sur les 14 ont été identifiés au genre et 2 l'ont été à la famille, leur état de larvules, ne permettant pas d'affiner la détermination.

<sup>2</sup> *Capnia* est un taxon hivernal présent dans les petites rivières et *Nemurella picteti* est typique des eaux stagnantes (Linke et al., 1999; Charvet et al., 2000; Tachet et al., 2000).



Figure 34 : Distribution des Plécoptères le long du linéaire Loire étudié.

Pour l'**Ordre des Trichoptères**, outre la synthèse de Tachet *et al.* (2000), nous disposons de deux études réalisées l'une en Loire (Ivol *et al.*, 1997), l'autre sur la Vienne, qui est un autre affluent de la Loire appartenant à la même écorégion (Tachet *et al.*, 2001). La distribution des Trichoptères que nous avons observée est comparable à celle de Ivol *et al.* (1997) et répète l'information précédente (même zonation que celle obtenue avec les Plécoptères). A partir de la station 5, la présence de deux espèces (*O. maculatum* et *C. lepida*) typiques des rivières larges selon Tachet *et al.* (2001), renforce l'idée que cette partie du linéaire constitue bien une zone intermédiaire entre rhithron et potamon. De plus nos résultats confortent les observations effectuées en aval du Puy-en-Velay par Usseglio-Polatera *et al.* (2000a) et Guinand *et al.* (1996) qui avaient noté dans ce secteur une augmentation de taxons  $\beta$ -mésosaprobies, typiques des eaux mésotrophes tels que *C. lepida* et *P. pusilla*, deux espèces que nous avons également collectées.

L'étude de la distribution amont-aval de l'**Ordre des Ephéméroptères**, appuyée par les résultats de Tachet *et al.* (2001) sur la Vienne, conforte nos observations concernant la zonation amont-aval. *Paraleptophlebia* et *Habroleptoides*, qui sont bien représentés en amont (stations 1 à 3), disparaissent à partir de la station 4, marquant une certaine rupture dans le *continuum*. La présence de *Potamanthus luteus* et de *Raptobaetopus tenellus* en aval de la station 4, espèces typiques des zones de l'hyporhithron et de l'épipotamon selon les auteurs précités, met en évidence la transition progressive du rhithron au potamon.

**Cette étude comparative démontre la bonne concordance entre distribution théorique et celle observée le long du linéaire ligérien. Elle témoigne de la pertinence de simplifier l'échantillonnage aux seuils des cours d'eau et de réduire en laboratoire la détermination aux EPT, dans le cadre spécifique de la bio-évaluation de la qualité de l'eau.**

## V. Construction d'un modèle du « bon état écologique » sur un parcours de Loire de 150 km.

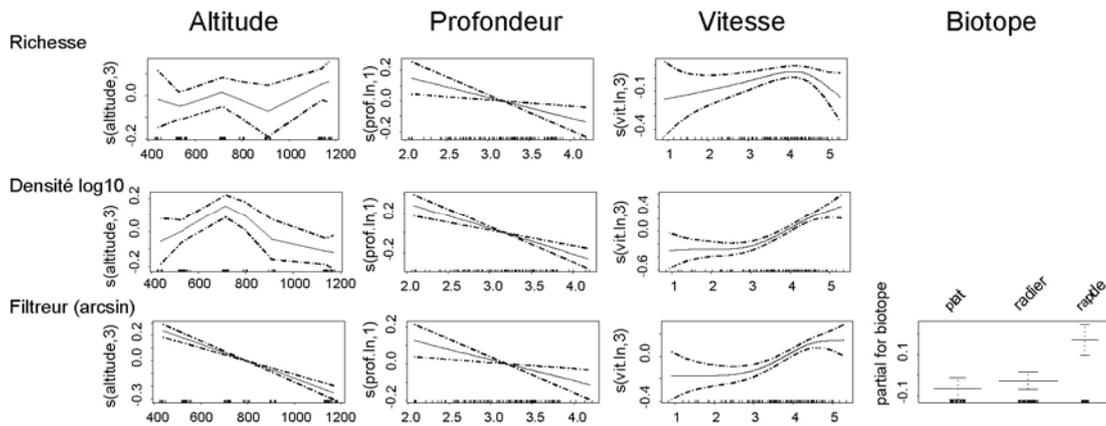
Du rhithron à l'épipotamon, le linéaire Loire étudié présente une richesse taxonomique élevée avec de nombreux genres d'EPT qui témoignent de la remarquable qualité de l'hydrosystème. Les taxons présents sur les différentes stations ont servi à l'établissement d'un modèle de référence du « bon état écologique » basés sur certaines variables pérennes et facilement mesurables, telles que l'altitude, la profondeur de l'eau, la vitesse du courant, etc. L'objectif est de construire des modèles susceptibles de prédire les paramètres écologiques et les taxons potentiellement présents en fonction de ces variables

de milieu et de mesurer d'éventuelles dérives futures liées à une modification de l'état des lieux. Cette modélisation présente également un intérêt comparatif vis-à-vis d'autres systèmes fluviaux similaires.

La méthode de modélisation retenue est celle de la régression multiple par la technique des Modèles Additifs Généralisés (MAG) (voir chapitre 2, p. 52). Les variables explicatives testées et retenues figurent dans le Tableau 36. Dans un premier traitement, les analyses de régression entre respectivement la richesse taxonomique, la densité, le pourcentage de filtreurs (mesurés pour chaque prélèvement) d'une part et l'altitude, les biotopes, la profondeur et la vitesse de l'écoulement d'autre part, se sont avérées significatives. Les modèles construits à partir de la densité et du pourcentage de filtreurs présentent une bonne qualité ( $r > 0,7$ ), ce qui n'est pas le cas pour la richesse taxonomique (Tab. 36). La densité est d'autant plus forte que les vitesses sont élevées et les profondeurs faibles, ces deux variables présentant des contributions très fortes ( $> 0,5$ ) (Fig. 35). Les pourcentages de filtreurs sont maximums pour des altitudes  $< 800$  m et pour des vitesses élevées, ces deux variables étant celles dont les contributions sont les plus fortes ( $> 0,3$ ).

**Tableau 36 : Synthèse des résultats des MAGs effectués sur le linéaire Loire. Les 5 premières colonnes correspondent aux contributions aux modèles des variables explicatives au seuil de  $p > 0,05$ . Les trois dernières colonnes sont les critères de validation**

	Altitude	Profondeur (log n)	Vitesse (log n)	Granulo (log n)	Biotope	Déviance expliquée (D <sup>2</sup> )	Validation croisée ( r )	Aire sous la courbe ROC
% filtreurs	<b>0,49</b>	<b>0,24</b>	<b>0,32</b>		0,24	0,73	<b>0,82</b>	
Densité (ind.m <sup>-2</sup> )	<b>0,27</b>	<b>0,54</b>	<b>0,7</b>			0,58	<b>0,72</b>	
Richesse (nb taxons)	0,13	0,29	0,22			0,19	0,36	
<i>Torleya major</i>	<b>10,4</b>					0,6	<b>0,79</b>	<b>0,93</b>
<i>Epeorus</i>	13,1	4,2	3,4	3,4		0,53	0,65	0,9
<i>Baetis</i>			14,1	8,4		0,56	0,57	0,88
<i>Paraleptophlebia</i>	30					0,45	0,57	0,84
<i>P. luteus</i>	42,7		4,7			0,39	0,47	0,86
<i>Ecdyonurus</i>	1,2	3,2				0,11	0,23	0,63
<i>Amphinemura</i>	<b>46,5</b>		<b>4,3</b>			0,65	<b>0,76</b>	<b>0,94</b>
<i>Taeniopteryx</i>	<b>32,5</b>	<b>6,1</b>	<b>5,3</b>			0,72	<b>0,73</b>	<b>0,96</b>
<i>Chloroperla</i>	9,7			12,2		0,54	0,58	0,93
<i>Perla</i>	7,9	3,9	4			0,31	0,44	0,83
<i>Leuctra</i>	2					0,1	0,32	0,71
<i>O. maculatum</i>	<b>45,9</b>	<b>9,3</b>				0,81	<b>0,87</b>	<b>0,98</b>
<i>C. marginata</i>	<b>13</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>		<b>2,5</b>	0,64	<b>0,75</b>	<b>0,92</b>
<i>Polycentropus</i>	4,2		2,8		2,4	0,39	0,56	0,82
<i>Micrasema</i>	15,7				5,4	0,4	0,41	0,82
<i>Sericostoma</i>	5,1					0,24	0,36	0,79
<i>Dupophilus</i>	2,2	3,3				0,17	0,38	0,75
Limoniini	4	3,9				0,38	0,54	0,83
<i>Dugesia</i>	<b>27,4</b>		<b>8,9</b>			0,58	<b>0,75</b>	<b>0,92</b>



**Figure 35 : Modèles Additifs Généralisés pour la richesse, la densité et le pourcentage de filtreurs. Courbes de réponses additives exprimées dans l'échelle du prédicteur linéaire (axe vertical) avec un intervalle de confiance à 95%.**

Des MAGs ont ensuite été calculés pour différents taxons considérés en présence/absence appartenant aux EPT, aux Coléoptères, aux Diptères et aux Planaires. Les modèles sont de bonne qualité pour *T. major*, *Amphinemura*, *Taeniopteryx*, *O. maculatum*, *Chimarra marginata* et *Dugesia* ( $r > 0,7$ ) et sont médiocres pour *P. luteus*, *Ecdyonurus*, *Perla*, *Leuctra*, *Micrasema*, *Sericostoma* et *Dupophylus* ( $r < 0,5$ ) (Tab. 36). D'une manière générale, l'altitude est la variable la plus contributive pour 12 cas sur 19, ce qui coïncide avec la plupart des modèles de très bonne qualité cités précédemment. De plus, les courbes de réponses additives sont très contrastées d'un taxon à l'autre, ce qui atteste du caractère spécifique de chacune des relations (Fig. 36 à 39).

Pour les **Ephéméroptères**, le modèle de *T. major* indique que ce taxon est bien représenté pour des altitudes  $> 800$  m (Fig. 36). Pour les **Plécoptères**, *Amphinemura* est présent à des altitudes  $> 600$  m et majoritairement dans des habitats caractérisés par des vitesses élevées. Il en est de même pour *Taeniopteryx*, taxon pour lequel le modèle prend également en considération la profondeur (présence majoritaire dans des habitats peu profonds) (Fig. 37). Pour les **Trichoptères**, nous observons que *O. maculatum* est majoritairement présent à des altitudes  $< 800$ m et à des profondeurs faibles (Fig. 38). Le modèle de *C. marginata* prend en considération toutes les variables utilisées pour établir les régressions. Ainsi, ce taxon est bien représenté pour des altitudes comprises entre 600 et 900 m, sur les biotopes rapides et plats et dans des habitats caractérisés par des profondeurs faibles. Pour *Dugesia*, la présence est maximale à une altitude  $< 800$  m et pour une vitesse de l'écoulement élevée (Fig. 39).

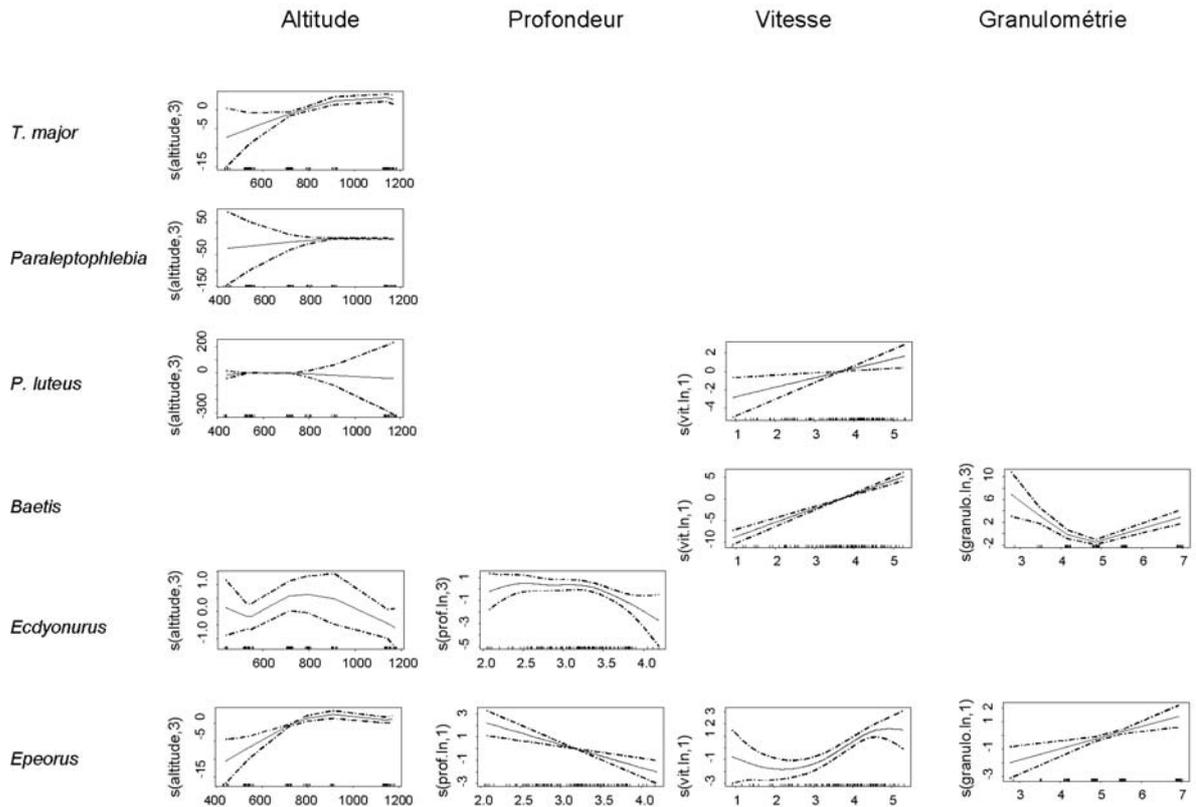


Figure 36 : Modèles Additifs Généralisés pour les six Ephéméroptères (en présence / absence). Courbes de réponses additives exprimées dans l'échelle du prédicteur linéaire (axe vertical) avec un intervalle de confiance à 95%.

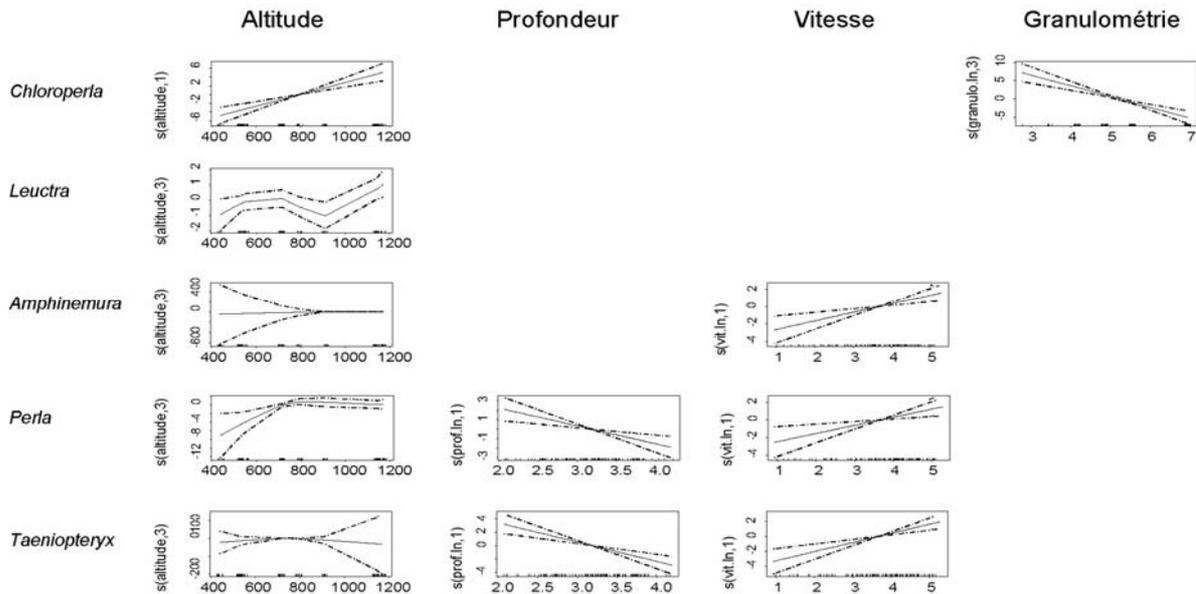
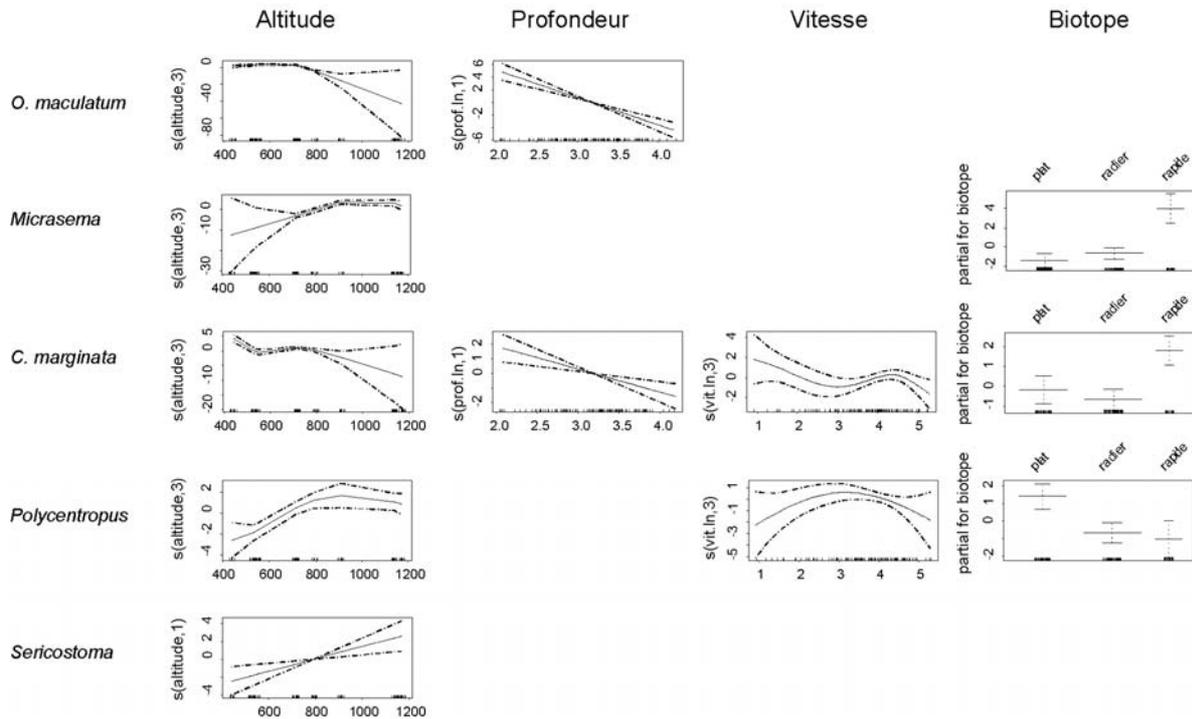
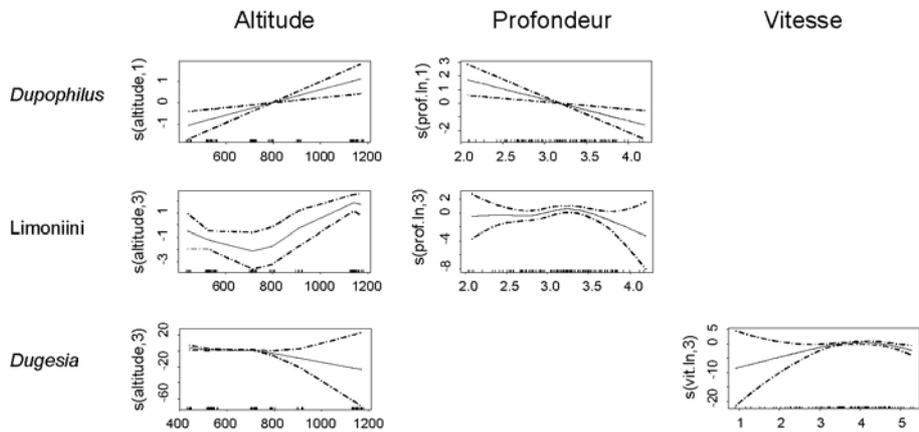


Figure 37 : Modèles Additifs Généralisés pour les cinq Plécoptères (en présence / absence). Courbes de réponses additives exprimées dans l'échelle du prédicteur linéaire (axe vertical) avec un intervalle de confiance à 95%.



**Figure 38 : Modèles Additifs Généralisés pour les cinq Trichoptères (en présence / absence). Courbes de réponses additives exprimées dans l'échelle du prédicteur linéaire (axe vertical) avec un intervalle de confiance à 95%.**

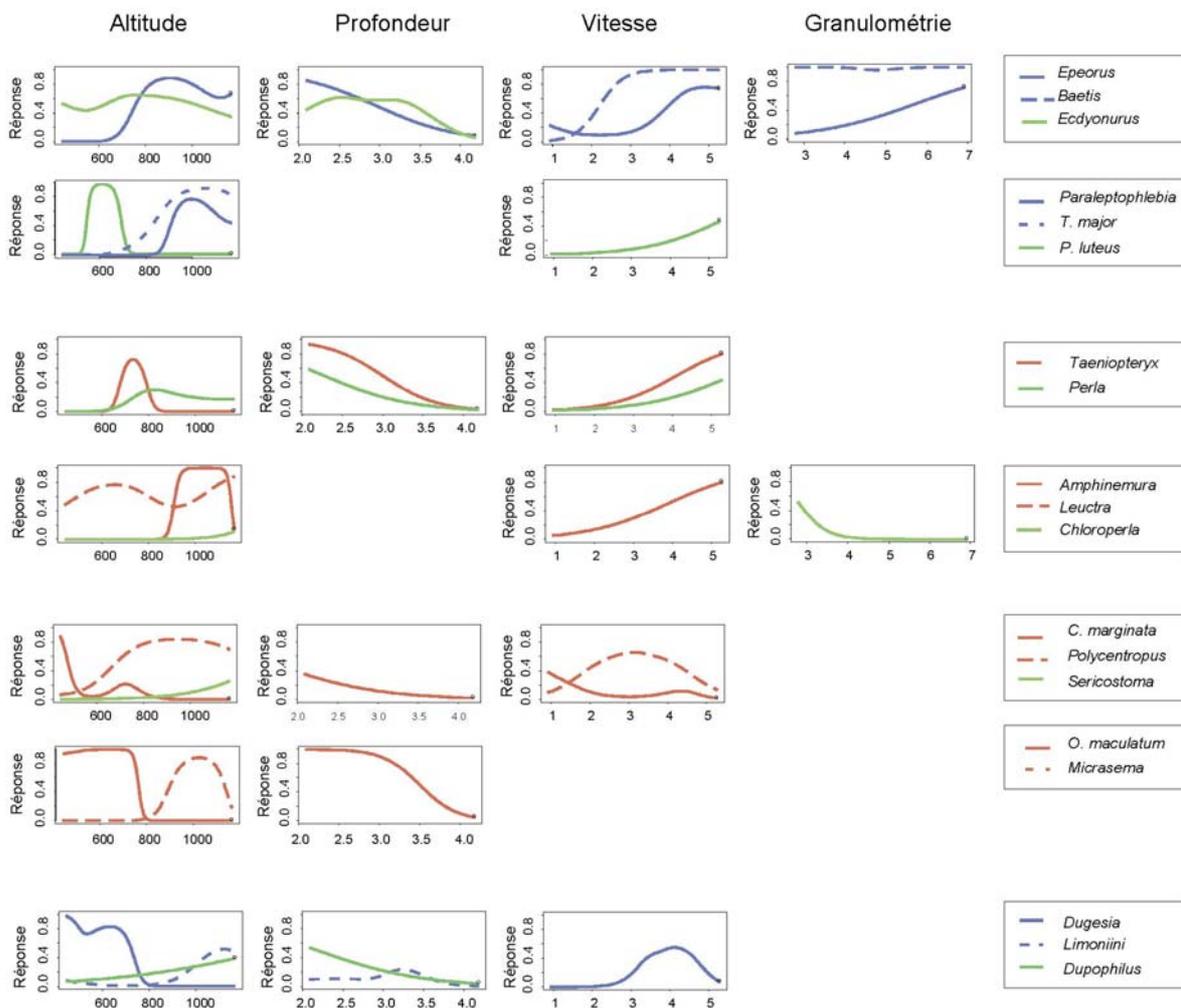


**Figure 39 : Modèles Additifs Généralisés pour les trois taxons (en présence / absence). Courbes de réponses additives exprimées dans l'échelle du prédicteur linéaire (axe vertical) avec un intervalle de confiance à 95%.**

La possibilité de superposer les courbes de réponses des taxons offre le moyen de comparer la réponse de différents taxons appartenant à un même Ordre, aux gradients des variables physiques retenues par les modèles (Fig. 40), l'axe vertical de l'échelle graphique exprimant leur probabilité

d'occurrence [0-1]. Ce mode de représentation permet d'identifier clairement les conditions environnementales qu'ils affectionnent de façon prioritaire au sein du *continuum*.

**Globalement, l'altitude est la variable dominante comparativement aux variables caractéristiques de l'habitat, que ce soit vis-à-vis des pourcentages de filtreurs ou de l'ensemble des taxons. La densité faunistique constitue une exception puisque sa distribution est prioritairement structurée par les vitesses et les profondeurs.**



**Figure 40 : Courbes de réponses superposées des 19 taxons (présence / absence) pour les variables sélectionnées par les GAM. L'axe vertical est exprimé en probabilité d'occurrence [0-1].**

## VI. Discussion et conclusion

*Dans le but d'analyser les communautés de macroinvertébrés sur un linéaire de rivière, avec une attention particulière pour les taxons polluo-sensibles nécessaires aux études de bio-évaluation de la qualité de l'eau, nous discuterons successivement du nombre nécessaire et suffisant d'échantillons à collecter sur une UG seuil, puis de la robustesse du protocole MMS-GUR appliqué sur un linéaire, ensuite de la possibilité de réduire l'interprétation des données aux EPT et enfin de l'éventualité de disposer d'un outil prédictif adapté au suivi du bon état écologique.*

### **Nombre nécessaire d'échantillons à retenir**

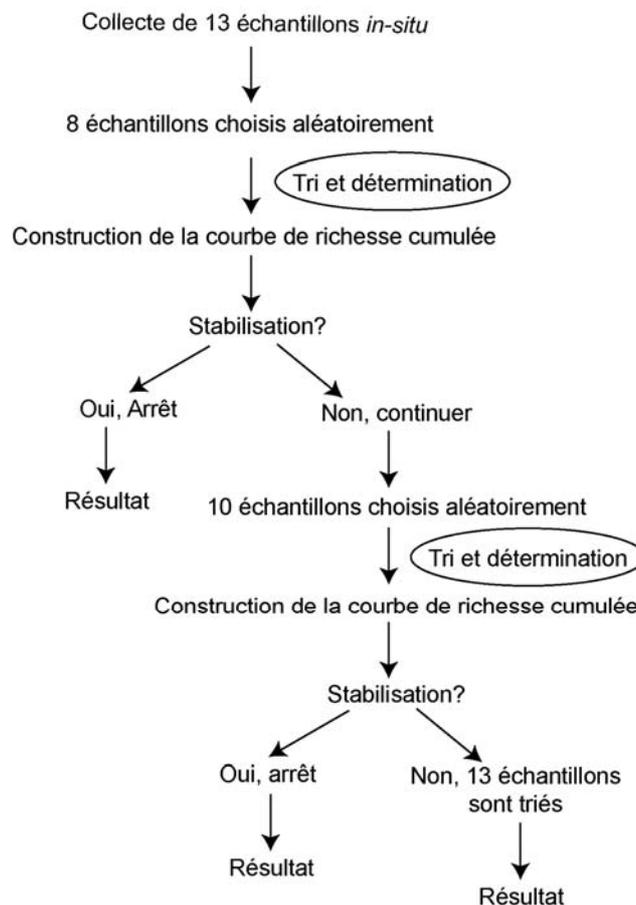
Dans l'analyse réalisée sur les échantillons prélevés au filet Surber sur les substrats minéraux de différents seuils, le nombre maximum d'échantillons, nécessaire pour stabiliser la richesse s'est avéré être de 13 (Beauger & Lair, 2008). Cet effort d'échantillonnage correspond à la surface échantillonnée par la méthode BMBM (proposée par Plotnikoff & Wiseman, 2001 ; cf. p. 25), méthode dans laquelle le préleveur collecte également les organismes sur des seuils et conforte les résultats obtenus.

Cependant, le protocole proposé ne tenant pas compte de la diversité des substrats caractérisant le lit d'une rivière, nous nous sommes interrogée sur les pertes potentielles inhérentes à la sélection des substrats minéraux par rapport à un échantillonnage multi-substrats (où les vases, litières, racines etc., présentes sur le site sont nécessairement échantillonnées). Il est vrai que, par rapport au protocole MMS-GUR, les taxons spécifiques à ces substrats (tels que *Bythiopseum* et *Micronecta* que nous avons recueilli dans les sables, *Physa* dans la vase et *Thraululus bellus* dans les litières, cf. Giller & Malmqvist, 1998 ; Monakov, 2003), entraînent une augmentation de la richesse taxonomique. Mais ce sont globalement des taxons polluo-tolérants qui n'apportent pas l'information nécessaire à l'évaluation de la qualité de l'eau (et le tri des prélèvements des substrats meubles est particulièrement consommateur de temps). De plus, certains de ces substrats représentent souvent de très petites surfaces et de telles analyses faunistiques tendent à surestimer leur importance, d'autant que si l'on se réfère aux modalités définies dans les TBEP (dont le degré de trophie et la valeur saprobiale), leur prise en compte conduit à une sous-estimation de la qualité de l'eau.

Notre attention a également été retenue par le fait que le nombre nécessaire d'échantillons augmentait en fonction de la position des stations dans le *continuum*, les taxons polluo-sensibles se faisant classiquement plus rares en descendant le long du linéaire. Il apparaît en effet, que dans le premier tiers amont du bassin (jusqu'à la station 5 de la Loire), 8 échantillons suffisent pour obtenir une richesse générique statistiquement significative, rejoignant en cela le nombre arbitraire préconisé dans le protocole multi-substrats normalisé en France (et qui s'est avéré efficace pour estimer la qualité de l'eau dans de nombreuses têtes de bassin). Mais dès que l'on s'éloigne de la source, le nombre de taxons polluo-sensibles diminuant, ce nombre d'échantillons devient insuffisant. En effet,

nous avons constaté que plus en aval, et selon les cas, le nombre d'échantillons devait nécessairement passer à 10 voire à 13.

Il est essentiel de maintenir la collecte *in-situ* de 13 échantillons à chacune des stations. Cependant, pour alléger le temps de travail en laboratoire, et dans la mesure où les résultats obtenus avec 10 et 13 échantillons se sont avérés dans certains cas très proches, il est possible d'en réduire le nombre durant l'étape de détermination des organismes en laboratoire. Pour cela, 8 échantillons (choisis aléatoirement parmi les 13) doivent être analysés. Si, sur la courbe de richesse cumulée tracée à partir des 8 échantillons, la stabilité de la richesse taxonomique est obtenue (sur la base de « moins de un nouveau taxon par échantillon »), l'analyse s'arrête. Dans le cas contraire, l'analyse doit passer à 10, voire s'étendre à 13 (Fig. 41).



**Figure 41 : Etapes de tri permettant de déterminer le nombre nécessaire d'échantillons pour obtenir une stabilisation de la richesse.**

Comparativement à une méthode multi-substrats, le protocole MMS-GUR, qui se limite à l'analyse des macroinvertébrés collectés sur des substrats minéraux, permet d'estimer la qualité de l'eau sans perte d'information. Le nombre nécessaire et suffisant d'échantillons est de 13, mais il peut être réduit à 10, voire à 8 durant le processus de tri.

### **Robustesse du protocole MMS-GUR appliqué sur un linéaire**

Le protocole MMS-GUR a été appliqué sur un linéaire Loire de près de 150 km, s'étendant de l'épirhithron à l'épipotamon, de manière à estimer la qualité de l'eau à partir de la richesse taxonomique (ainsi que de la densité) des macroinvertébrés benthiques collectés sur les substrats minéraux des seuils. La présence de taxons polluo-sensibles sur l'ensemble du parcours retrace l'évolution naturelle qui se produit le long des *continuums* fluviaux. Les variations observées révèlent la sensibilité du protocole MMS-GUR aux changements de la qualité de l'eau, les résultats obtenus étant ceux attendus. En effet, la distribution taxonomique de cet ensemble répond aussi bien aux variations d'origine naturelle (état physique ou biologique), qu'aux perturbations d'origine anthropique. Le poids des conditions naturelles prédomine sur les perturbations anthropiques jusqu'à la station 2. A la station 3, la diminution de la richesse taxonomique est liée à l'impact du barrage de la Palisse situé en amont. Bien que très hétérogène, la densité des macroinvertébrés demeure faible de la première station jusqu'à la station 3. Puis l'hétérogénéité s'accroît avec la diminution d'altitude. Plus en aval, à partir de la station 6 (où nous observons notamment la disparition de nombreux Plécoptères), la perte de taxons polluo-sensibles indique l'enrichissement progressif du milieu, et présage l'impact de la ville du Puy-en-Velay sur la qualité de l'eau. Celui-ci est marqué par une augmentation des teneurs en nitrates, etc. et se traduit à nouveau par des densités pouvant atteindre plus de 16.000 ind.m<sup>-2</sup>. L'arrivée du Lignon induit un effet de dilution, perceptible à la station 8 où la qualité chimique de l'eau s'est améliorée. Cependant, la présence des taxons caractéristiques du *continuum* fluvial est effective, illustrant le fait que ces impacts successifs, même s'ils ont un effet local indéniable, ne sont pas la cause essentielle des changements faunistiques observés.

### **Possibilité de simplifier l'analyse faunistique**

Toujours dans un souci de simplification, et de manière à réduire encore le temps de l'analyse (et de son coût), nous avons cherché à vérifier si les déterminations des groupes faunistiques pouvaient être limitées aux Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères. Nous avons donc examiné la distribution de ces trois Ordres (EPT), collectés sur les substrats minéraux des seuils aux différentes stations du linéaire Loire. Il apparaît que l'analyse faunistique peut être limitée à ces Ordres, car elle permet de discriminer les stations le long du *continuum* de la même manière qu'avec l'ensemble de la communauté de macroinvertébrés.

L'ensemble des observations réduites à la distribution des EPT permet de tracer l'évolution amont-aval du linéaire étudié qui, de ce fait, correspond à une zone s'étendant de l'épirhithron à

l'épipotamon (Guinand *et al.*, 1996 ; Ivol *et al.*, 1997 ; Tachet *et al.*, 2000 ; Usseglio-Polatera *et al.*, 2000a ; Tachet *et al.*, 2001). En effet, les stations 1 à 3, présentant les plus fortes richesses en EPT, vont de l'épirhithron au métarhithron. Plus en aval, les stations 4 et 5 (hyporhithron), assurent la transition, dans la mesure où la richesse en EPT diminue et où certains genres de Plécoptères disparaissent au profit de nouveaux genres, moins polluo-sensibles. Enfin, à partir de la station 6, la raréfaction des Plécoptères et la présence de taxons typiques de l'hyporhithron et de l'épipotamon indiquent la tendance potamique qui se dessine en aval (Guinand *et al.*, 1996 ; Ivol *et al.*, 1997 ; Tachet *et al.*, 2001).

A l'évolution naturelle des conditions hydromorphodynamiques du cours d'eau le long du linéaire étudié, se sont ajoutées d'une part l'importance des géoformes au regard de la distribution même de la macrofaune et d'autre part la pression humaine, cependant atténuée. En effet, les caractéristiques de la station 5, pourtant située en amont de la ville du Puy-en-Velay et non impactée, se rapprochent de celles des stations situées plus en aval. Cette tendance s'explique par la particularité hydromorphologique de cette station sur laquelle la présence d'une longue zone d'eau lenticule et peu profonde favorise la sédimentation et le colmatage du substrat par les fines. La macrofaune benthique se rapproche alors des communautés rencontrées en aval de la ville du Puy-en-Velay et, dans ce cas, la nature de l'habitat prédomine sur la qualité de l'eau en général, démontrant là encore qu'il est important de bien connaître les secteurs étudiés pour interpréter les résultats.

**Le choix du linéaire, nous a ainsi permis de tester l'efficacité du protocole MMS-GUR jusqu'à l'épipotamon inclus et de proposer une analyse faunistique simplifiée, car réduite aux EPT.**

### **Un outil de référence au suivi du bon état écologique**

Le linéaire Loire, retenu pour valider le protocole d'échantillonnage MMS-GUR étant exempt d'impacts majeurs et présentant une macrofaune benthique encore bien diversifiée, peut être considéré comme référentiel d'un « bon état écologique 2004 ». Dans la perspective du suivi de son évolution à moyen terme - et bien que les effets « vitesse et profondeur, caractérisant les habitats » ne soient pas négligeables en termes de densité - il apparaît que l'altitude, associée aux variables caractérisant la dimension amont-aval qu'elle englobe, prédomine sur les effets locaux. En termes de modèles prédictifs, des taxons polluo-sensibles tels que *Taeniopteryx*, *Amphinemura*, *O. maculatum*, *C. marginata* et *T. major* (ou encore *Dugesia* voire *Paraleptophlebia* et les Limoniini polluo-tolérants) peuvent servir de base au suivi du bon état écologique

L'échantillonnage effectué sur les substrats minéraux des seuils et l'examen faunistique réduit aux genres d'Ephéméroptères, Plécoptères & Trichoptères ont permis : 1) d'intégrer non seulement les variations naturelles de l'hydrogéomorphologie fluviale le long du linéaire, mais également les dégradations d'origine anthropique d'intensité limitées subies par le milieu naturel ; 2) de positionner le linéaire étudié depuis le crénon jusqu'à l'épipotamon ; 3) d'établir un outil de prédiction de la distribution des taxons.