

# ETUDE THERMIQUE GLOBALE DU RHONE

## PHASE III

### **Lot 3 : Etude locale des différences biologiques entre rive soumise aux rejets thermiques et rive froide**



**ARALEP**

*Ecologie des Eaux Douces*

Domaine Scientifique de la Doua, Bât. CEI-66, Bd Niels Bohr, BP 2132  
69603 VILLEURBANNE Cedex



**Cemagref** Lyon, Unité de Recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques  
3 bis, quai Chauveau CP 220  
69336 Lyon Cedex 09

**Avril 2006**

**Lot 3.1 : Influence du rejet thermique de la centrale  
nucléaire de Saint-Alban sur les macro-invertébrés et  
les macrophytes**

---

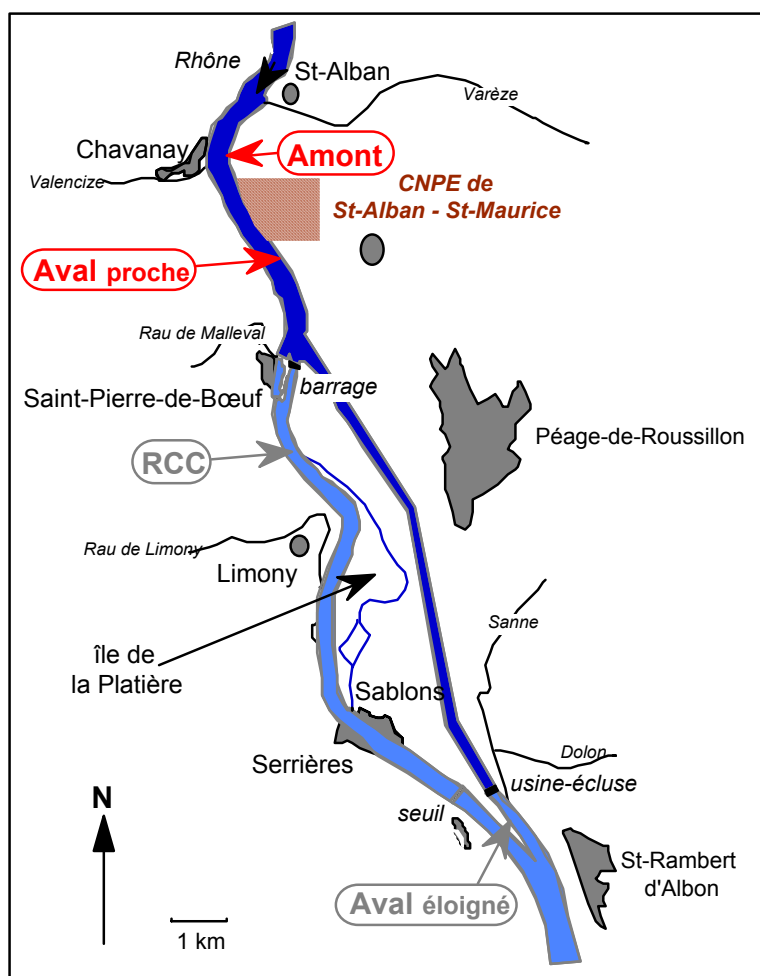
## SOMMAIRE

<b>1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2 - LES MACROPHYTES AQUATIQUES.....</b>	<b>2</b>
2.1 - Evolution de la richesse floristique.....	2
2.2 - Evolution des espèces dominantes.....	2
<b>3 - LES MACROINVERTEBRES BENTHIQUES.....</b>	<b>4</b>
3.1 - Evolution de la richesse taxonomique et de l'abondance.....	4
3.2 - Evolution temporelle des peuplements.....	6
3.3 - Evolution temporelle des taxons dominants.....	11
<b>4 - CONCLUSION S.....</b>	<b>15</b>
<b>5 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES.....</b>	<b>15</b>

## 1 - Introduction

Le mélange incomplet dans un premier temps de l'eau réchauffée et de l'eau du fleuve induit l'existence de zones hétérogènes de température en aval des CNPE, à l'origine potentielle de différences biologiques locales, principalement au niveau des zones rivulaires. Concernant le site de Saint-Alban, ce phénomène est étudié pour la végétation macrophytique et les invertébrés benthiques, descripteurs particulièrement intégrateurs qui, contrairement aux poissons, subissent passivement ce réchauffement.

Deux stations de suivi sont plus particulièrement concernées par cette étude spécifique, la station de **référence amont** du site (pk 47) et la station **aval proche** (pk 49), le rejet s'effectuant aux environs du pk 48,5. Ces deux stations sont situées sur la retenue de l'aménagement CNR de Péage-de-Roussillon (Figure 1) et une comparaison pourra être faite avec une référence plus "naturelle", la station RCC située sur la partie court-circuitée.



**Figure 1.** Localisation des stations d'échantillonnage amont et aval proche (pk 47 et 49) au sein de l'aménagement CNR de Péage-de-Roussillon.

Le tableau I ci-dessous donne un aperçu du delta T amont-aval moyen à une dizaine de mètres de la rive (valeurs rive gauche), enregistré en surface lors des profils thermiques saisonniers aux pk 47, 49 et 50.5 entre 1986 et 2004. Celui-ci apparaît remarquablement homogène aux environs de 5°C (moyenne annuelle = 5,3°C) à la station aval proche (pk 49) et partagé en deux saisons (froide - chaude) à la station soumise à une certaine dilution (pk 50.5) (moyenne annuelle = 2,3°C).

**Tableau I.** Evolution saisonnière du delta T amont-aval moyen mesuré lors des transects physico-chimiques (rejet au pk 48.5).

Saison	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Station pk 49	5,7	5,3	5,1	5,0
pk 50.5	1,5	2,8	2,9	1,9

## 2 - Les macrophytes aquatiques

Les macrophytes sont échantillonnés en période estivale (1 campagne annuelle jusqu'en 2000, 2 campagnes annuelles par la suite) au niveau de **trois secteurs** de la retenue situés en amont du site (rive gauche) ainsi que sur les deux rives en aval de celui-ci. Les relevés se font selon des **transects successifs** d'une dizaine de mètres de largeur, perpendiculaires à la rive, permettant de couvrir de 1 (amont rive gauche et aval rive droite) à 2 (aval rive gauche) kilomètres linéaires de rive. La rive aval centrale rive gauche a par la suite été subdivisée en deux stations distinctes (aval proche et aval plus éloigné). Chaque espèce rencontrée est estimée par un indice qui permet une **évaluation semi-quantitative** de la végétation.

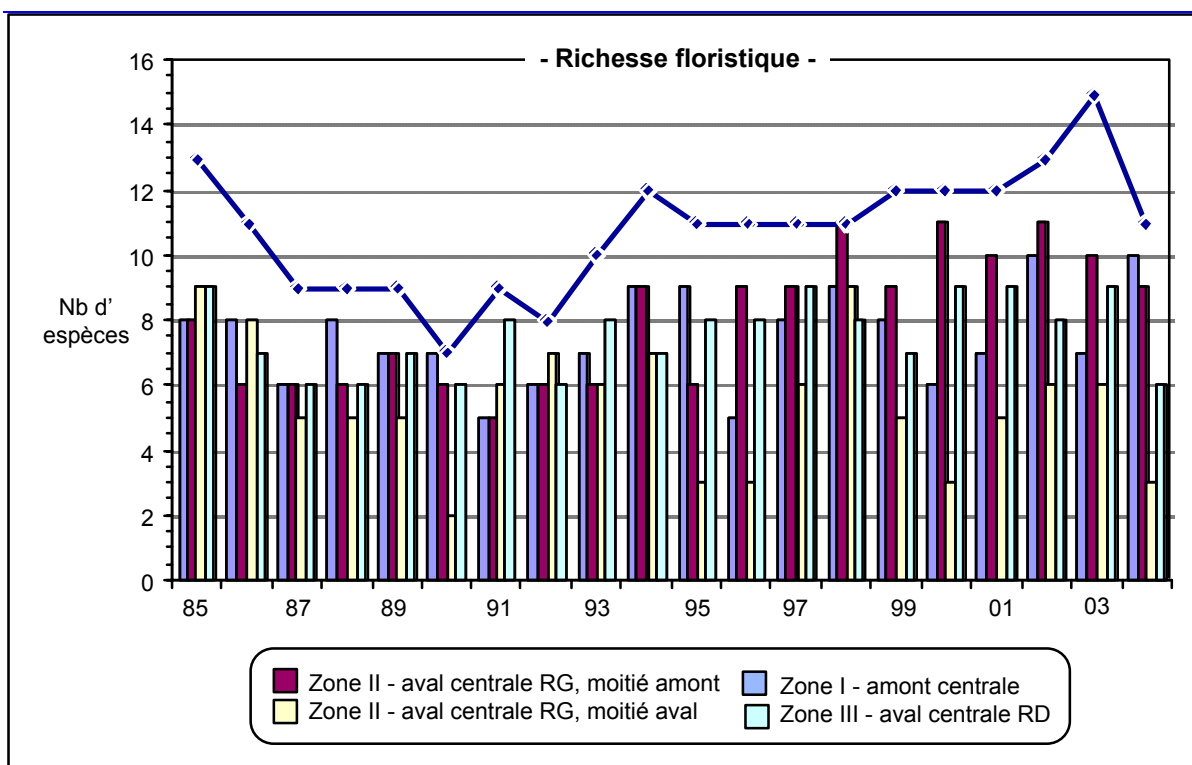
### 2.1 - Evolution de la richesse floristique

Lors de la première décennie de relevés, la richesse moyenne annuelle était très similaire entre les quatre stations (Tableau II). Si elle est restée stable aux stations amont et aval rive droite, elle s'est accrue et a été multipliée par 5 entre les périodes 1985-1994 et 1995-2004 entre les stations aval CNPE rive gauche, au détriment de la station aval plus éloigné. Toutefois, à l'échelle du suivi, les stations amont, aval rive droite et aval proche rive gauche présentent une richesse floristique identique, tandis que seule se distingue la station aval éloigné rive gauche.

La distinction en deux sous-unités de la zone située en aval du site sur la même rive fait ainsi apparaître de façon récurrente depuis une dizaine d'années une richesse nettement plus faible des transects situés sur la moitié la plus aval de cette station (pk 50 à 51) par comparaison aux points situés sur la partie la plus amont (pk 49 à 50) (Tableau II et Figure 2), ceci en dépit d'une dilution devenant effective sur le tronçon le plus éloigné (cf. Tableau I). La différence de richesse entre ces deux zones apparaît s'être accentuée dans le courant des années 1990 (Tableau II).

**Tableau II.** Evolution selon différentes périodes de la richesse floristique moyenne des macrophytes (algues filamenteuses exclues) aux quatre zones d'observations, la zone aval centrale rive gauche étant subdivisée en deux.

Zone	Période	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	1985-1994	1995-2004	1985-2004
Amont		7	7	8	8	7	8	8
Aval RG proche		7	6	9	10	7	10	8
Aval RG éloigné		6	6	5	5	6	5	5
Aval RD		7	7	8	8	7	8	8



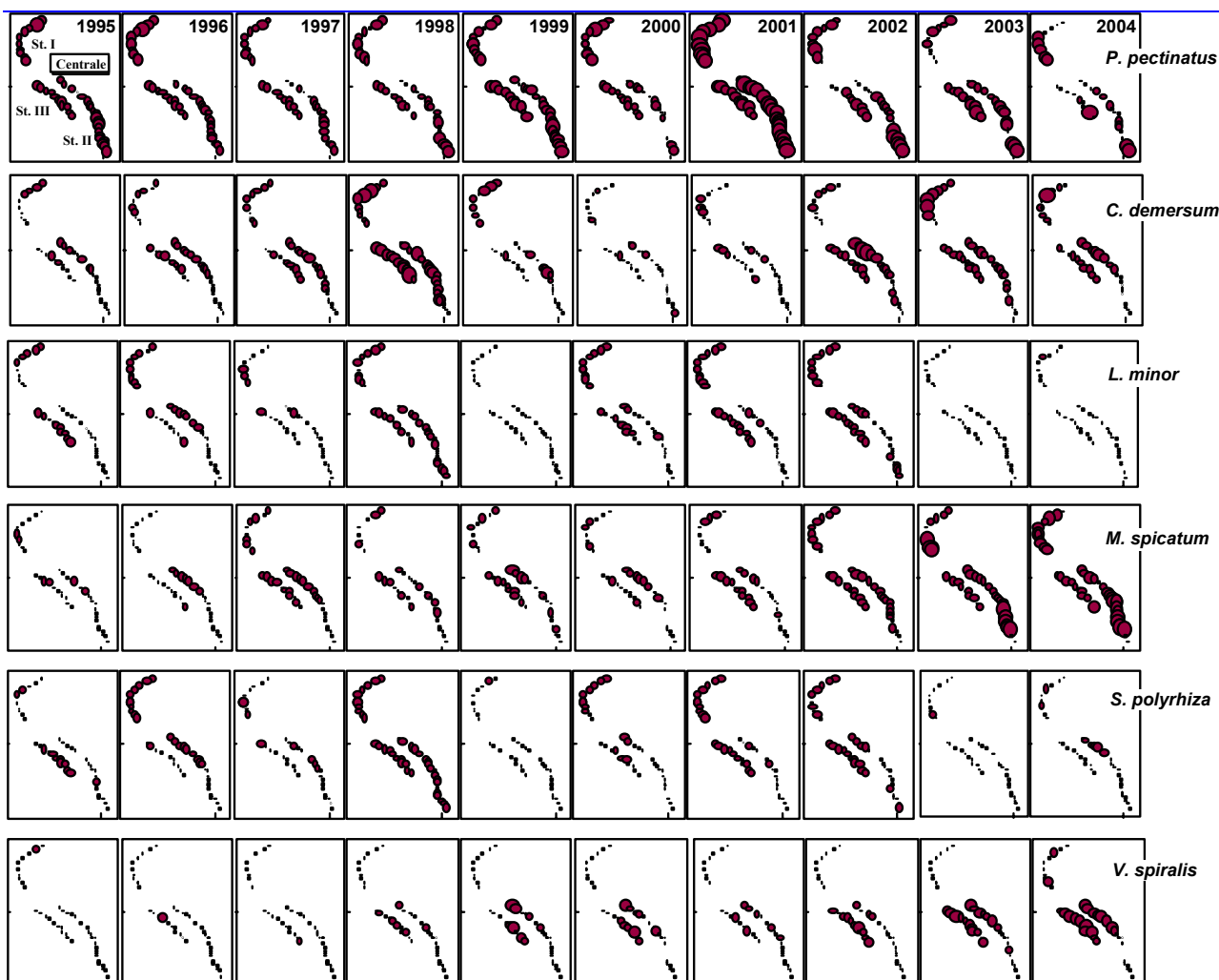
**Figure 2.** Evolution inter-annuelle de la richesse spécifique des macrophytes (algues filamenteuses exclues) aux quatre zones d'observations, la zone II aval centrale rive gauche étant subdivisée en deux (histogrammes), et sur l'ensemble du secteur (diamants).

## 2.2 - Evolution des espèces dominantes

La répartition des espèces dominantes (Figure 3) montre ainsi la très faible abondance de celles-ci sur cette seconde partie de station, voire leur absence régulière depuis quelques années (cf. en particulier *Spirodela*, *Vallisneria*, *Ceratophyllum* en 2004).

En dehors de l'échauffement, variable de moins de 2°C en période froide (hiver et automne) jusqu'à 3°C en période chaude (printemps et été), soit 2,3°C en moyenne annuelle (cf. Tableau I), et en dépit de la grande homogénéité structurale de la retenue (blocs d'enrochements de rive et banquettes littorales sédimentaires), le peuplement de macrophytes semble défavorisé par le caractère morphodynamique de cette zone située à l'extrémité aval de la retenue : basculement progressif du chenal de navigation vers la rive gauche avec une rupture de pente plus proche de la rive, donc une zone d'implantation limitée afin d'éviter le batillage ; turbidité un peu plus importante liée à la proportion d'eau du Rhône par rapport à l'eau du rejet (retour du flux principal en direction du canal de dérivation) ; léger accroissement de la vitesse du courant par "aspiration" du flux principal vers le canal de dérivation.

Ainsi, lorsque les conditions physiques sont favorables (large banquette sédimentaire, disponibilité en nutriments, turbidité modérée, courant stable et lent), la **diversité des macrophytes** semble **peu affectée** par un échauffement permanent voisin de 5°C. Toutefois, une espèce comme *Lemna minor*, caractéristique d'eaux plutôt eutrophes, donc considérée comme assez tolérante, ne supporte pas des réchauffements estivaux trop élevés.



**Figure 3.** Evolution de la répartition et de l'abondance lors de la campagne de juillet des espèces de macrophytes les plus fréquentes.

### 3 - Les macroinvertébrés benthiques

Les invertébrés sont échantillonnés avec un pas de temps saisonnier selon deux méthodes d'échantillonnage : des substrats artificiels rivulaires et des dragages du chenal. Dans le cadre de cette analyse, seuls les résultats des prélèvements par **substrats artificiels** sont considérés, l'influence thermique se ressentant essentiellement sur la zone rivulaire.

#### 3.1 - Evolution de la richesse taxonomique et de l'abondance

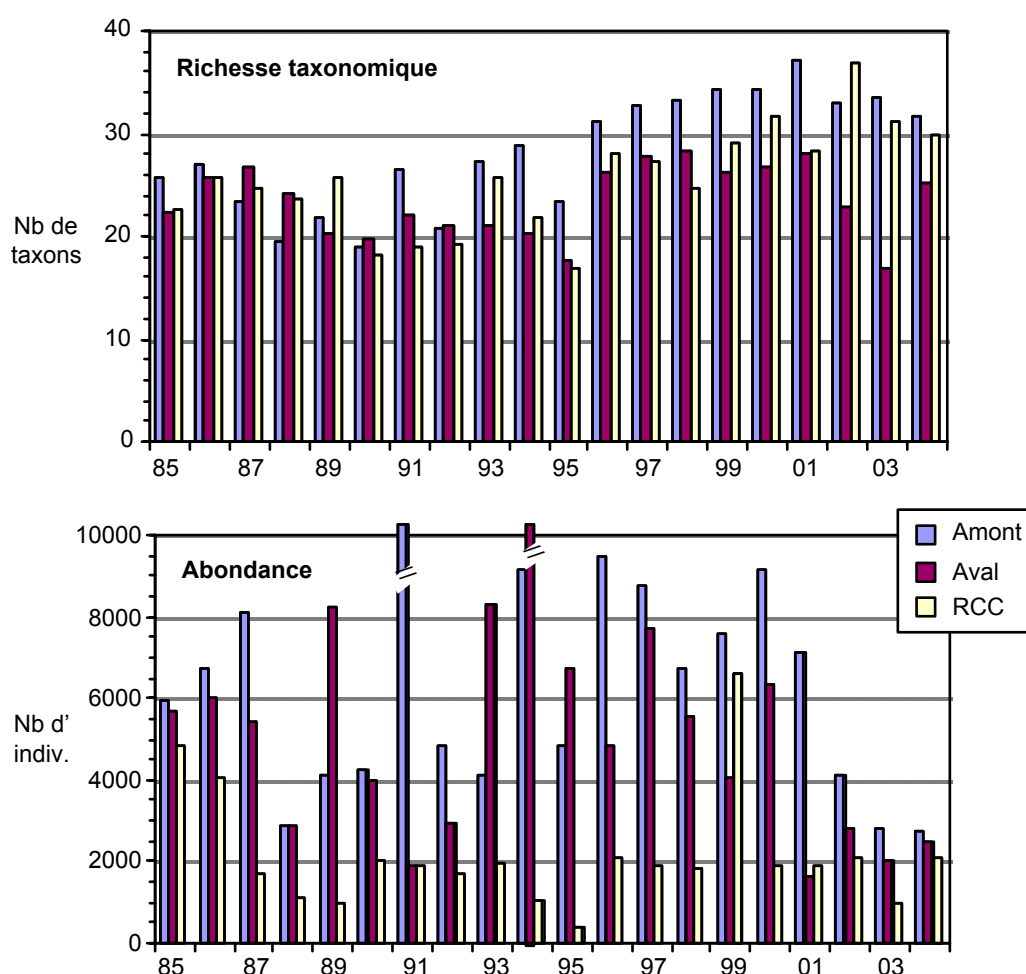
Un total de **179 relevés** (respectivement 89 à la station amont et 90 à la station aval) et de **133 taxons** (juvéniles compris) (respectivement 122 taxons à la station amont, 101 à la station aval, avec 90 taxons communs) a ainsi été répertorié.

En dépit de fluctuations inter-annuelles, la richesse taxonomique et les effectifs capturés aux différentes stations semblent subir une évolution inverse depuis une dizaine d'années (Figure 4). Toutefois, le tableau ci-dessous montre que si l'augmentation de richesse au cours de la chronique est statistiquement significative

pour la station amont et la partie court-circuitée (RCC), station de référence plus naturelle que la retenue, la tendance à une diminution de richesse qui semble se dessiner depuis le début des années 2000 n'est pas statistiquement significative sur la durée de la chronique et demande à être confirmée lors des années futures.

	Amont	Aval	RCC
Richesse par substrat unitaire	$R^2 = 0.31 - P = 10^{-4}$	NS	$R^2 = 0,184 - P = 10^{-4}$
Abondance par substrat unitaire	NS	NS	NS
Richesse moyenne annuelle	$R^2 = 0.64 - P = 10^{-4}$	NS	$R^2 = 0.376 - P = 0.004$
Abondance moyenne annuelle	NS	NS	NS

De la même manière, les valeurs de ces paramètres à la station aval sont depuis une dizaine d'années constamment inférieurs à ceux de la station amont non impactée (Figure 4). Si ce constat semble effectif sur les dernières années de la chronique, il est uniquement statistiquement avéré sur l'ensemble de la durée du suivi que pour la richesse taxonomique ( $R^2 = 0.095$  et  $p = 10^{-4}$  pour les prélèvements unitaires ;  $R^2 = 0.216$  et  $p = 0.0026$  pour la richesse moyenne annuelle).



**Figure 4.** Evolution inter-annuelle de la richesse taxonomique totale et de l'abondance moyenne par substrat artificiel unitaire.

La baisse des effectifs est en grande partie imputable à la chute des Aselles (Figure 5), particulièrement sensible à la station aval réchauffée et dans le RCC (respectivement  $R^2 = 0.179$  et  $p = 10^{-4}$  et  $R^2 = 0.065$  et  $p = 0.0162$  pour les prélèvements unitaires).



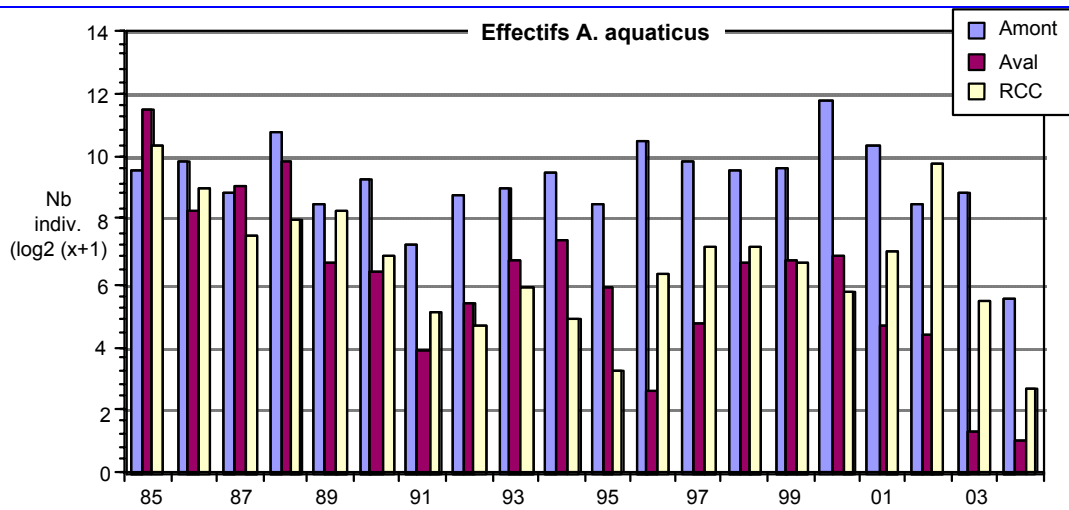


Figure 5. Evolution inter-annuelle des effectifs d'Aselles.

De manière voisine à la végétation, la similitude de la structure rivulaire, et donc d'habitat, le long de la retenue permet de penser que la structure physique du milieu n'est pas en cause dans les différences de richesse et d'abondance amont - aval, ou très peu si ce n'est quelques différences localisées d'envasement des zones rivulaires. Le réchauffement moyen d'environ 5°C auquel est soumis la station aval (cf § 1) semble donc bien être un facteur important dans l'explication de ces différences de composition faunistique. Dans le cas des Aselles, on peut également s'interroger sur l'influence de l'apparition et du développement du Gammare invasif *Dikerogammarus villosus* au cours des dernières années (Figure 6). Mais en l'absence d'une étude précise de dynamique des populations de ces deux espèces, il est difficile de trancher sur l'impact réel de ce facteur biologique par rapport au facteur thermique.

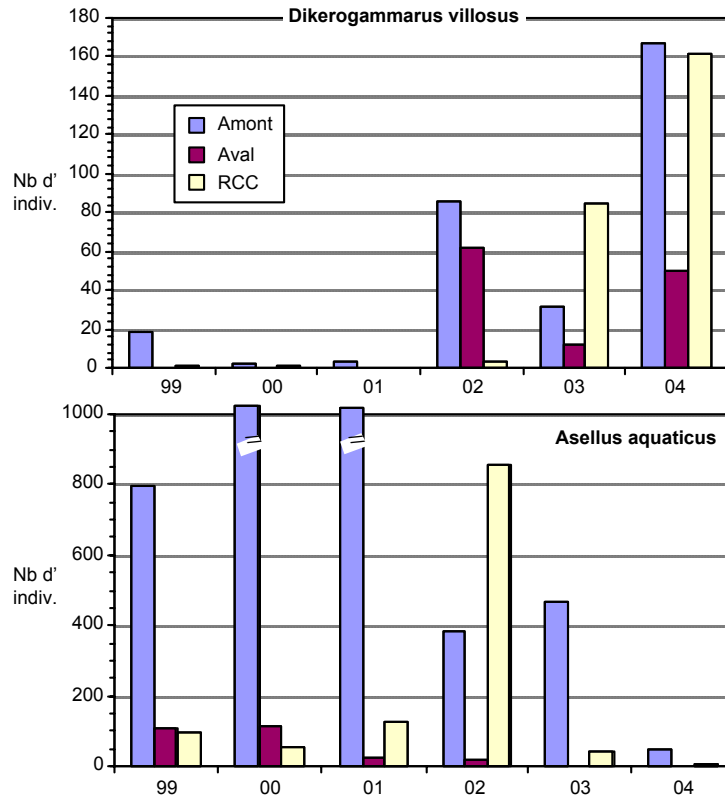


Figure 6. Comparaison de l'évolution des effectifs de *D. villosus* et d'*A. aquaticus*.

### 3.2 - Evolution temporelle des peuplements

Une analyse plus précise de la structure des peuplements a été réalisée par analyse multivariée sur un tableau contenant les relevés unitaires de substrats artificiels aux stations amont et aval proche entre 1985 et 2004, soit 179 relevés, et en ayant conservé les taxons non accidentels sur les critères d'abondance ( $> 2$  individus sur le total de l'étude) et d'occurrence (présence dans plus de 2 relevés au total), soit 96 taxons (juvéniles compris).

La méthode d'analyse choisie est l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) inter- et intra-classes (Dolédec & Chessel, 1989), qui permet de prendre en compte, ou au contraire d'éliminer, certains effets (spatiaux et temporels) liés au processus expérimental. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997) sur le tableau 179 relevés x 96 taxons.

L'évolution des coordonnées des centres de gravité sur l'axe F1 de l'analyse inter-années montre une évolution graduelle des peuplements avec un basculement à partir de l'année 1999 (Figure 7). L'évolution des coordonnées de ces mêmes centres de gravité sur le second axe de l'analyse distingue 3 périodes successives (Figure 7) qui correspondent aux périodes identifiées dans l'analyse générale du Rhône (cf. Bady & Fruget, 2006), à savoir une première période avec une structure des peuplements peu marquée, une seconde période durant laquelle une dérive temporelle des conditions environnementales est enregistrée accompagnée d'une évolution plus marquée des peuplements, enfin une période post-crués importantes, canicule et post-canicule.

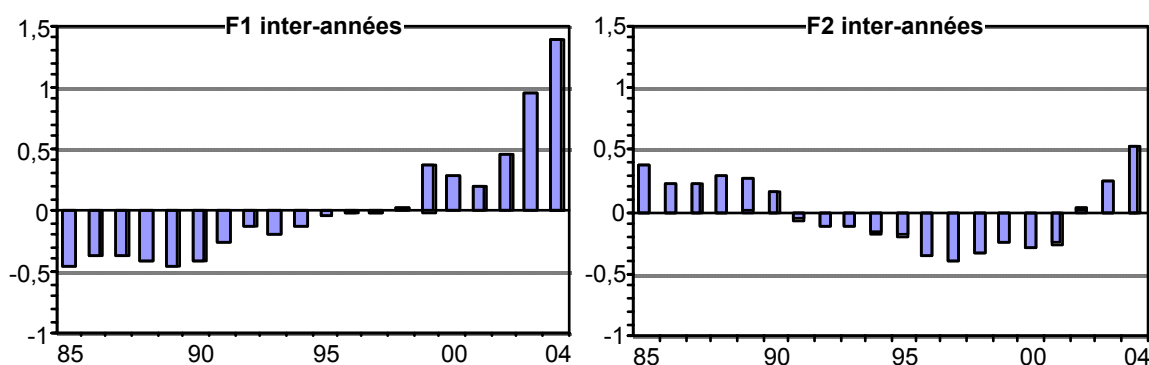
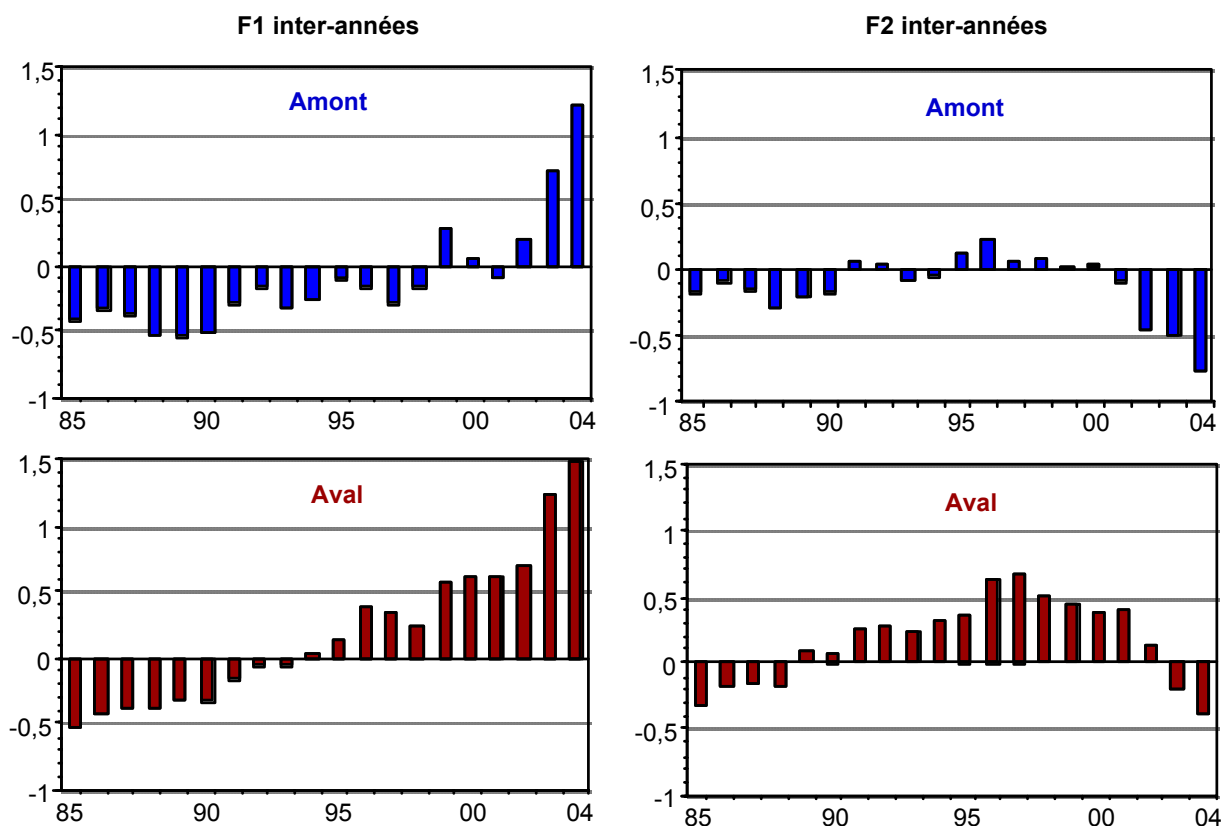


Figure 7. Evolution temporelle des coordonnées des centres de gravité de l'analyse inter-années sur les deux premiers axes factoriels.

En distinguant les stations amont et aval dans la même analyse, on constate que celles-ci évoluent différemment (Figure 8). Que ce soit sur le premier ou le second axe, la station amont présente un basculement marqué de son peuplement essentiellement à partir de la période post-crués de mars 2001 et novembre 2002 suivie de la canicule de l'été 2003 et de l'année post-canicule 2004. Par contre, l'axe F1 montre un basculement radical du peuplement de la station aval dès le milieu des années 1990 (post-crués de l'hiver 1993-94), tandis que le glissement temporel en trois périodes est conservé sur l'axe F2.

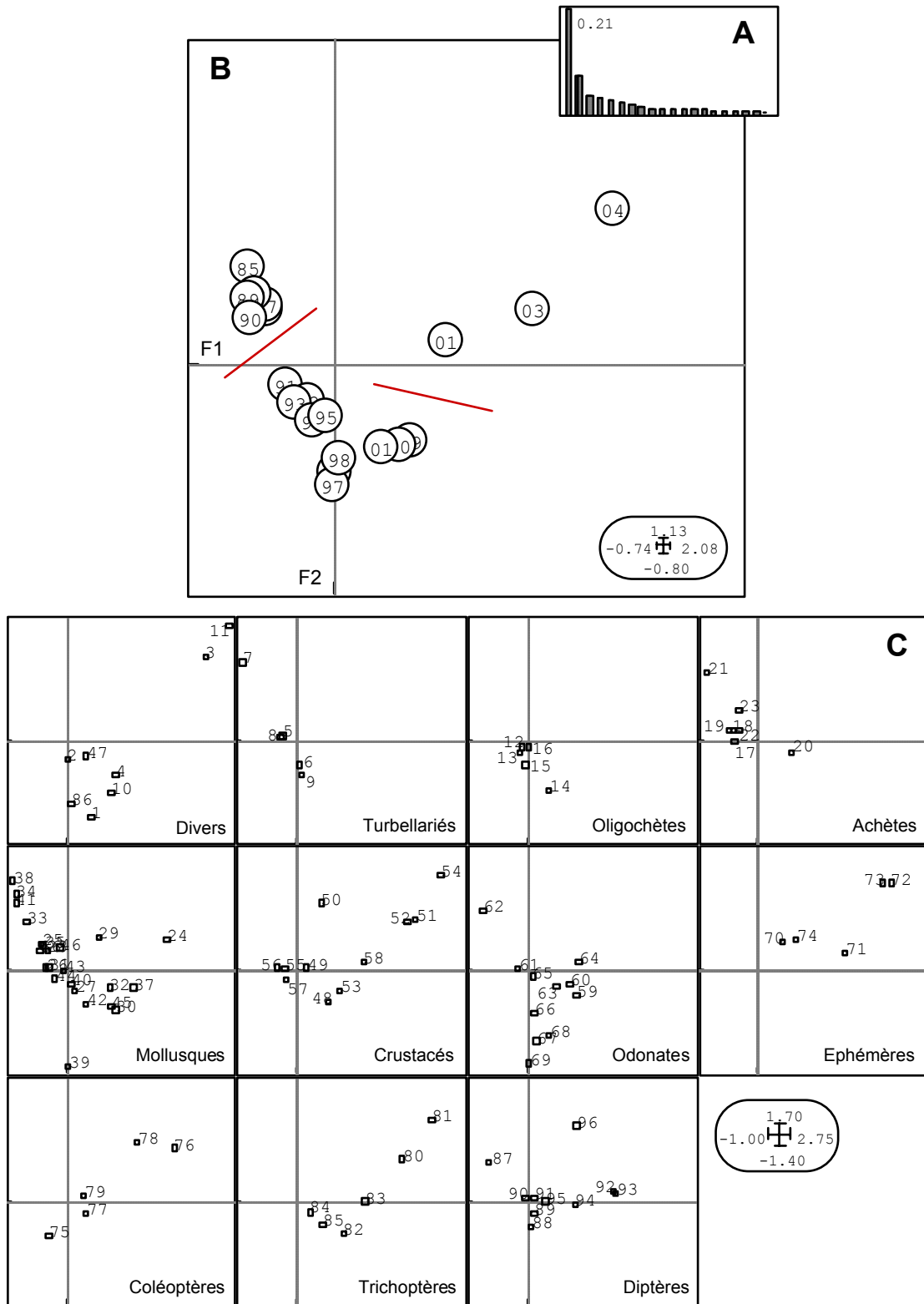


**Figure 8.** Evolution temporelle par station des coordonnées des centres de gravité de l'analyse inter-années sur les deux premiers axes factoriels.

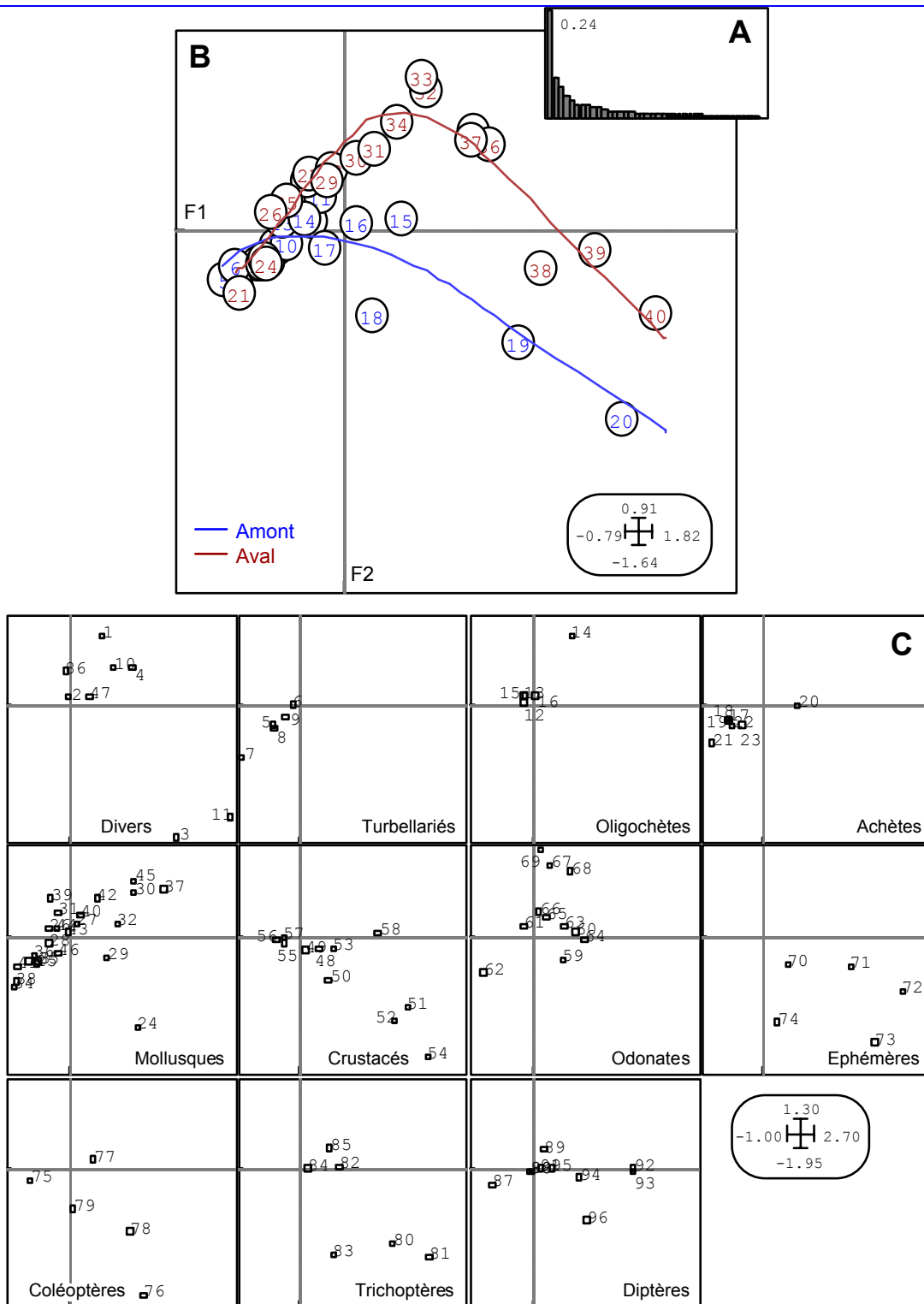
La carte factorielle 1\*2 de l'analyse générale inter-années (respectivement, pour chacun des axes, 40% et 14% de l'inertie totale de l'analyse) confirme pour les deux stations de la retenue de Péage-de-Roussillon la partition en trois périodes successives décrite dans l'évolution générale des peuplements de macroinvertébrés à l'échelle du Rhône (Figure 9B).

Les taxons les plus représentatifs de cette évolution, pour les deux stations considérées, sont le Bryozoaire *Plumatella* (taxon "divers" n° 3), le Polychète invasif *Hypania invalida* (taxon "divers" n° 11), les Gammarus invasifs *Gammarus tigrinus* et *Dikerogammarus villosus* et les juvéniles associés (taxons "crustacés" n° 51-52-54), divers Ephémères du genre *Caenis* (taxons n° 71-72-73), les deux Coléoptères Elmides des genres *Elmis* et *Oulimnius* (taxons n° 76 et 78, uniquement représentés à la station amont), les Trichoptères Hydroptilidés *Hydroptila* et *Orthotrichia* (taxons n° 80 et 81). Ces taxons sont apparus et/ou se sont essentiellement accrus durant la dernière période. Ce sont soit des espèces exotiques invasives, soit des espèces à tendance potamo-lénitique (i.e. à affinité pour des vitesses de courant modérées) et eurytherme. A l'opposé, les Aselles (taxons "crustacés" n° 55-56-57 pour *Asellus aquaticus*, *Proasellus meridianus* et les juvéniles associés), sont positionnées du côté de la première partie de la chronique de suivi (Figure 9C).

La même analyse réalisée en distinguant les deux stations (respectivement, pour chacun des axes, 29% et 11% de l'inertie totale de l'analyse) montre une évolution temporelle similaire pour chacune d'elles mais avec un léger décalage (Figure 10B). Si le peuplement de la station amont reste assez homogène jusqu'aux environs de l'année 1999 pour ensuite évoluer nettement, celui de la station aval évolue progressivement et graduellement tout au long de la chronique 1985-1999 pour ensuite suivre la même évolution brutale sur les années 2000 (Figure 10B). Les taxons en cause sont les mêmes que ceux identifiés pour l'analyse générale inter-années (Figure 10C).



**Figure 9.** Plan factoriel 1\*2 de l'AFC inter-années. **A.** Graphe des valeurs propres. **B.** Carte factorielle des relevés (représentés par les centres de gravité des classes, i. e. années). **C.** Carte factorielle des taxons séparés par groupes faunistiques.



**Figure 10.** Plan factoriel 1\*2 de l'AFC inter-années distinguée par stations. **A.** Graphe des valeurs propres. **B.** Carte factorielle des relevés (représentés par les centres de gravité des classes, i. e. années de 1 à 20 pour 1985 à 2004 à la station amont et de 21 à 40 pour 1985 à 2004 à la station aval). **C.** Carte factorielle des taxons séparés par groupes faunistiques.

### 3.3 - Evolution temporelle des taxons dominants

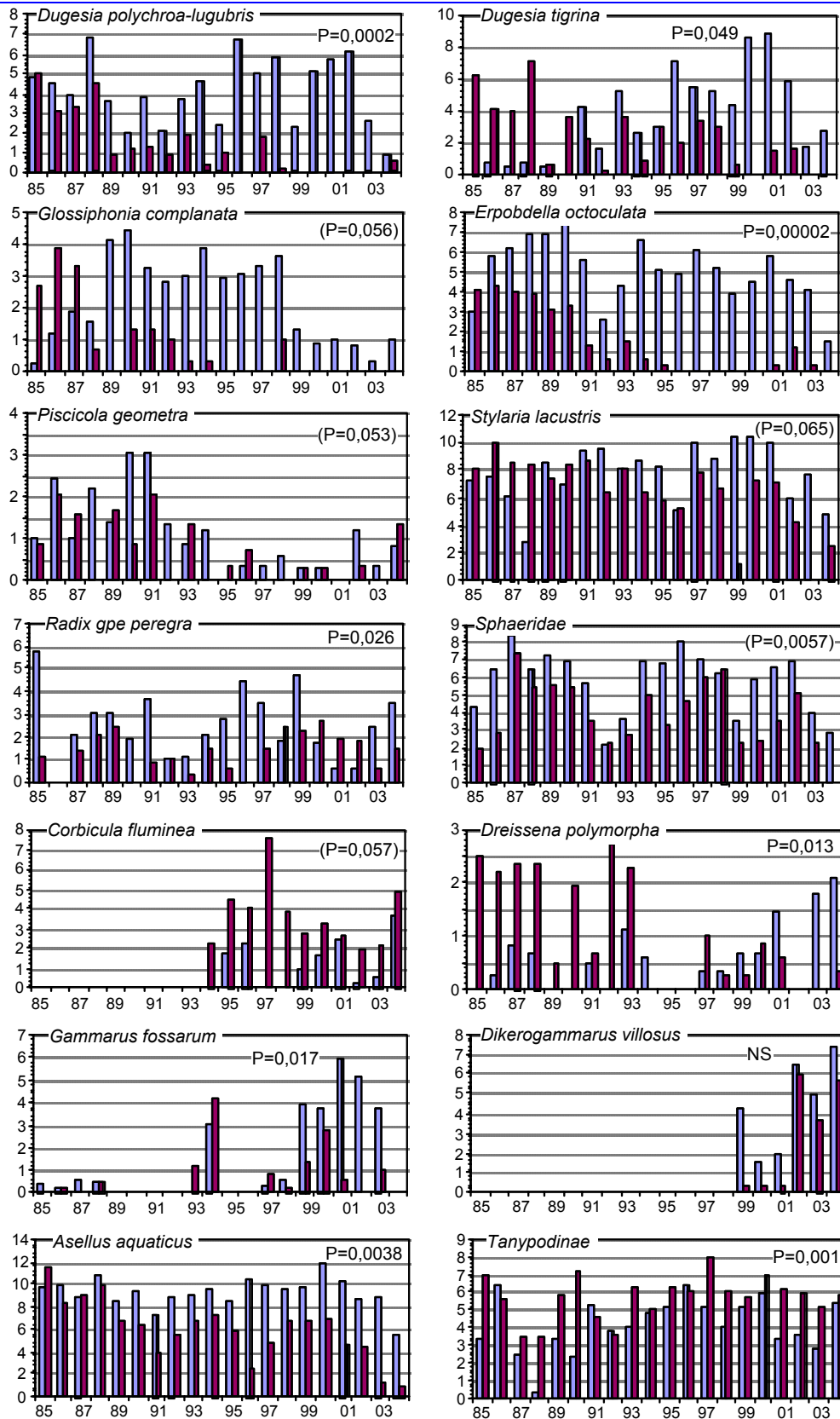
La figure 11 représente l'évolution des effectifs de diverses espèces au cours des 20 années d'étude et les différences d'abondance enregistrées aux deux stations considérées durant cette chronique. La signification statistique de ces différences a été testée par une ANOVA 1.

Les Planaires *Dugesia polychroa-lugubris* et *Dugesia tigrina*, l'Oligochète *Stylaria lacustris*, les Sangsues *Glossiphonia complanata*, *Erpobdella octoculata* et *Piscicola geometra*, les Mollusques *Radix groupe peregra* et *Sphaeridae*, le Gammare autochtone *Gammarus fossarum* et les Aselles *Asellus aquaticus* présentent **des effectifs** statistiquement **plus élevés en amont** de la centrale par rapport à l'aval.

A l'opposé, les Corbicules, les Dreissènes, l'écrevisse américaine *Orconectes limosus* (non représentée) et les Diptères *Tanypodinae* et *Chironomus groupe plumosus* sont statistiquement **plus abondants en aval du site**.

Les effectifs du Gammare invasif *Dikerogammarus villosus* ne diffèrent pas statistiquement entre les stations amont et aval.

Les Planaires, Sangsues et Crustacés (natifs) semblent ainsi particulièrement affectés par l'échauffement.



**Figure 11.** Evolution inter-annuelle de l'abondance moyenne par substrat artificiel (nombre d'individus exprimé en  $\log_2(x+1)$ ) de taxons particulièrement significatifs entre l'amont et l'aval de la centrale. Le résultat de l'ANOVA sur les prélèvements unitaires est indiqué pour chaque taxon.

## 4 - Conclusions

En dépit de fluctuations inter-annuelles notables (richesse spécifique tant pour les macrophytes que les invertébrés, effectifs d'invertébrés), des différences localisées apparaissent entre les peuplements floristiques et faunistiques de la station de référence amont et de la station située en aval proche du CNPE.

Ces stations étant toutes les deux localisées sur la retenue de l'aménagement CNR de Péage-de-Roussillon, elles sont soumises aux mêmes contraintes physiques (excepté l'aspect thermique) et présentent la même structure de zone rivulaire et d'habitat, hormis certains phénomènes très localisés d'envasement. Un delta T moyen annuel d'environ 5°C est noté entre ces deux stations.

Si la diversité des macrophytes semble peu affectée par cet échauffement, en dépit d'une réduction de la variété et de l'abondance de ceux-ci sur une partie de la zone en aval du CNPE, le facteur thermique semble être un facteur de contrôle plus important dans la structuration des peuplements de macroinvertébrés de la station aval pour lesquels la richesse taxonomique est statistiquement inférieure à celle de l'amont sur la durée de l'ensemble de la chronique d'étude. Ainsi, l'augmentation significative de richesse enregistrée au cours du temps pour les stations amont et RCC n'est pas effective à l'aval du CNPE.

La richesse taxonomique et les effectifs d'invertébrés capturés aux différentes stations semblent subir une évolution inverse depuis une dizaine d'années. Toutefois, sur la durée des 20 années d'étude, si l'augmentation de richesse est statistiquement significative, la tendance à une diminution des effectifs qui semble se dessiner depuis le début des années 2000 demande à être confirmée lors des années futures.

Les Planaires, Sangsues et Crustacés (natifs) semblent être les groupes faunistiques les plus affectés par l'échauffement. Toutefois, le fort développement récent de différentes espèces d'invertébrés invasifs, dont le Crustacé *Dikerogammarus villosus*, mérite d'être plus finement considéré, en particulier vis-à-vis des populations d'Aselles, afin de bien faire la part entre l'influence de la température d'une part et d'une compétition biologique potentielle d'autre part.

## 5 - Références bibliographiques citées

- Bady P. & Fruget J.F. 2006. *Etude thermique globale du Rhône. Phase 3. Influence de la variabilité hydroclimatique 1985-2004 sur les peuplements de macroinvertébrés*. Rapport conjoint ARALEP - LEHF Université Lyon 1 à EDF DTG, 30 p.
- Dolédec S. & Chessel D. 1989. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. II. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 10 (3), 207-232.
- Thioulouse J., Chessel D., Dolédec S. et Olivier J.M. 1997. ADE-4 : a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 7, 75-83. (<http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4/ADE-4F.html>)



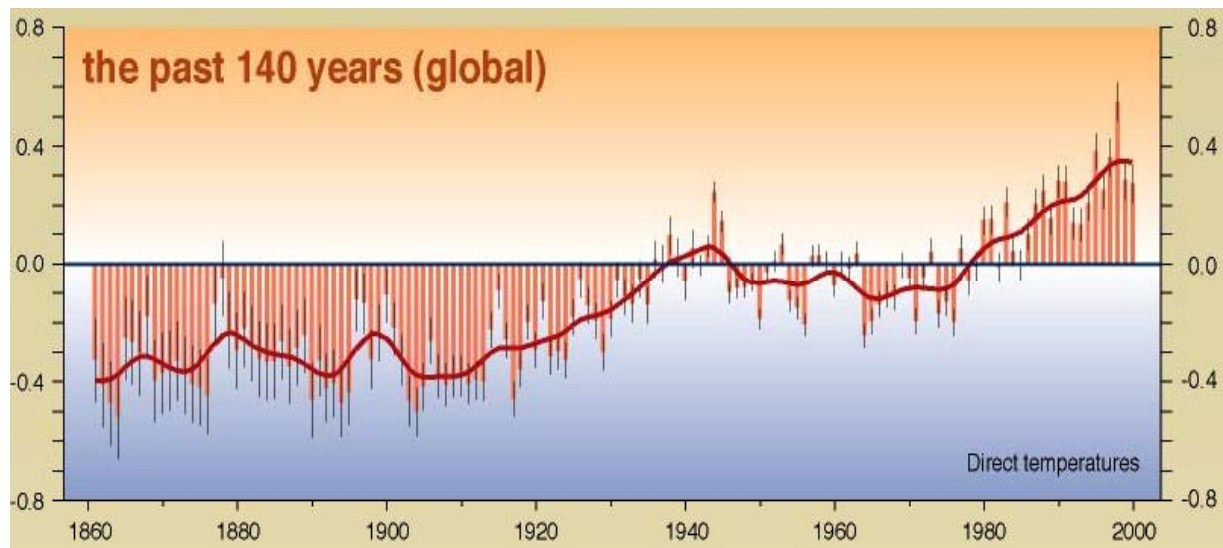
**Lot 3.2 : Influence du rejet thermique de la centrale  
nucléaire de Bugey sur les communautés de poissons  
du Rhône**

# Sommaire

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>2</b>
<b>II.</b>	<b>MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>4</b>
1.	<b>Site, stations et échantillons .....</b>	<b>4</b>
2.	<b>Analyses Statistiques .....</b>	<b>5</b>
	Modifications graduelles de la structure de la communauté de poissons .....	5
	Effets du CNPE avec prise en compte des effets du réchauffement climatique .....	5
	Effets du CNPE et espèces dites « marginales » .....	6
<b>III.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>7</b>
1.	<b>Modifications graduelles de la communauté de poissons .....</b>	<b>7</b>
2.	<b>Effets du CNPE avec prise en compte des effets du réchauffement climatique ....</b>	<b>10</b>
3.	<b><i>Effets du CNPE et espèces dites « marginales »</i> .....</b>	<b>13</b>
	Analyse factorielle des correspondances (AFC) .....	13
	STATIS sur AFC .....	15
<b>IV.</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>17</b>
1.	<b>Evolution temporelle du peuplement du Rhône dans le secteur de Bugey.....</b>	<b>17</b>
2.	<b>Effet du CNPE Bugey .....</b>	<b>17</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>18</b>

## I. INTRODUCTION

Depuis la fin des années 80, un nombre croissant de travaux dédiés à l'étude des phénomènes climatiques a permis de développer et de vérifier l'hypothèse d'un réchauffement global de la planète. Au cours des 140 dernières années, marquées par une forte activité industrielle et des rejets massifs de gaz à effet de serre, la température du globe a progressivement augmenté d'environ 0,6°C (**Figure 1**).



**Figure 1.** Chronique de l'anomalie thermique mondiale (Source IPCC 2001). Chaque année, cette anomalie est définie comme la différence entre la température moyenne mondiale annuelle et la température moyenne mondiale calculée sur les 140 dernières années.

Les effets largement distribués de ce réchauffement climatique ainsi que son accélération récente le rendent incontournable lorsque l'on aborde des questions d'écologie, en raison de l'importance du facteur thermique. Il est essentiel d'en connaître l'influence sur les organismes, d'abord pour en estimer les conséquences, ensuite pour être capable d'en éliminer statistiquement l'éventuel effet pour analyser d'autres processus écologiques. Par ailleurs, d'un point de vue appliqué, il est primordial de pouvoir prendre en compte les effets de ce réchauffement climatique pour la gestion des autres contraintes anthropiques exercées sur le milieu. C'est en particulier le cas pour les rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE) comme l'ont démontrées les mesures prises au cours de l'épisode caniculaire de l'été 2003.

Des études préalables, basées sur les données recueillies pour EDF autour de divers CNPE, ont pu montrer que le changement climatique avait probablement déjà des effets marqués sur les écosystèmes d'eau courante (Daufresne et al., 2004 ; Daufresne et Boët, 2005 ; Daufresne et Boët, *soumis*). Ces études ont par ailleurs souligné un faible effet relatif des CNPE sur les modifications graduelles des communautés de poissons au cours des 25 dernières années. Cela **ne signifie pas que les CNPE n'ont pas d'effet sur la structure des communautés**, mais :

- (1) que l'effet du changement climatique est relativement prépondérant et qu'il explique une part importante de la variabilité globale des jeux de données.

(2) que les stations soumises ou non au réchauffement dû aux centrales présentent des modifications similaires sur le long terme.

Ces deux points soulignent que les changements globaux sont suffisamment importants pour masquer l'effet des centrales dans une **analyse globale** des jeux de données. Comme signalé précédemment, il est donc primordial d'éliminer statistiquement ces effets pour avoir une vision plus claire de l'effet spécifique des CNPE.

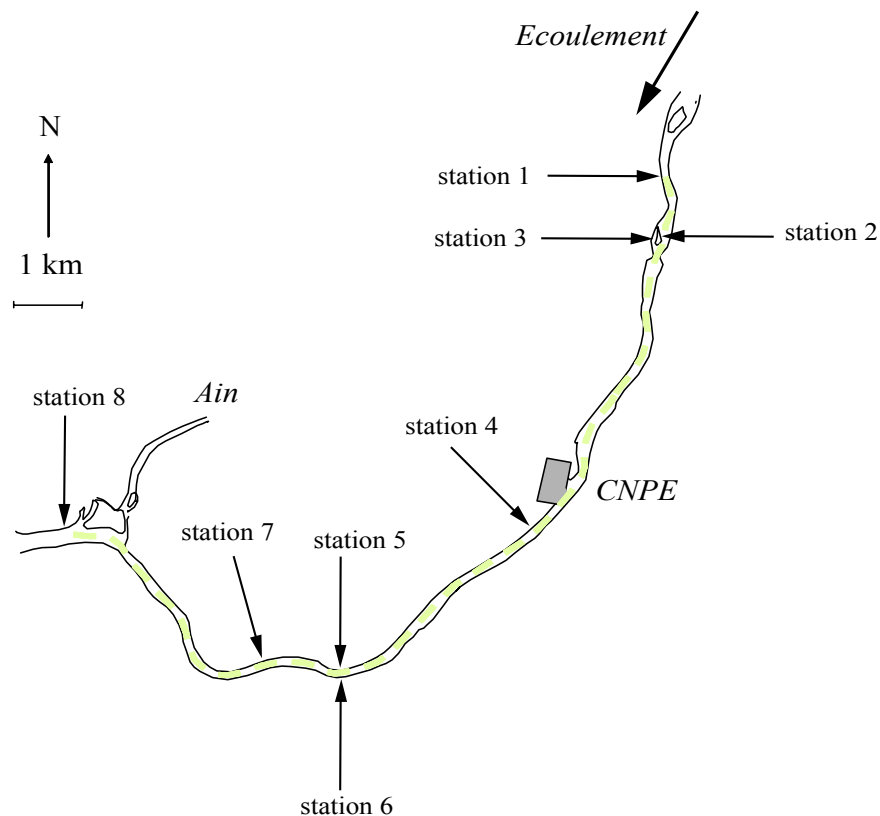
Tel est l'objectif du présent travail, qui vise à préciser les effets des CNPE sur la structure des communautés de poissons de grands cours d'eau français, en prenant en compte les effets du réchauffement climatique.

Les chroniques de données recueillies pour EDF autour du CNPE de Bugey sont étudiées dans ce but. Nous analysons d'abord les tendances d'évolution globale du peuplement de poissons du site. Cela nous permet de préciser si les tendances de modifications à long terme du peuplement décrites par Daufresne et al. (2004) sont confirmées par les données les plus récentes. Nous détaillons ensuite l'effet du CNPE sur la structure de la communauté une fois ces tendances prises en compte.

## II. MATERIELS ET METHODES

### 1. Site, stations et échantillons

Nous utilisons des données récoltées pour EDF par le Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative du Cemagref de Lyon autour du CNPE de Bugey (Figure 2). Entre mars 1979 et août 2004, les poissons ont été échantillonnés une fois par saison sur un ensemble de 8 stations. Trois stations sont soumises au panache thermique provenant de la centrale : les stations 4, 5 et 7 (stations dites « réchauffées »). Ce panache étant exclusivement localisé le long de la rive droite du fleuve, on considère que 5 stations ne sont pas soumises à son effet : les stations 1, 2, 3, 6 (stations dites « non réchauffées ») et 8. La station 8, localisée immédiatement en aval de la confluence avec l'Ain, apparaît morphologiquement très différente des autres stations et est analysée séparément des autres stations dans la suite du document. Les échantillons sont réalisés par pêche électrique, en bateau, le long des berges et en continu pendant 30 minutes. Les poissons sont mesurés, déterminés à l'espèce puis relâchés.



**Figure 2.** Site d'étude et localisation des stations de pêches. Les stations 4, 5 et 7 sont soumises à un réchauffement dû au panache thermique de la centrale.

Pour chaque pêche, l'effectif de chaque espèce est corrigé et exprimé pour 20 minutes d'échantillonnage (Capture Par Unité d'Effort, ou CPUE) par souci d'homogénéité avec d'autres travaux (Grenouillet *et al.* 2001, Cattaneo *et al.* 2001, Daufresne *et al.* 2004). Pour normaliser les données, les CPUE sont transformées en  $\ln(\text{CPUE}+1)$ .

## 2. Analyses Statistiques

### ***Modifications graduelles de la structure de la communauté de poissons***

Nous réalisons une analyse en composante principale (ACP) sur le tableau des  $\ln(\text{CPUE}+1)$  par pêches (lignes) et par espèces (colonnes). Nous travaillons sur le tableau centré par espèce. La variance inter-station est préalablement évaluée et nous testons sa significativité par permutations. Comme Daufresne et al. (2004), nous étudions ensuite les chroniques temporelles des coordonnées factorielles moyennes annuelles des différentes stations d'échantillonnage sur les axes factoriels. Pour cela, nous définissons une année biologique de juin (année  $n$ ) à mai (année  $n+1$ ) (Daufresne et al., 2004 ; Daufresne et Boët, 2005 ; Daufresne et Boët, *soumis*). L'effet de la centrale est évalué en comparant les tendances pour les stations soumises ou non à l'influence du rejet.

### ***Effets du CNPE avec prise en compte des effets du réchauffement climatique***

Afin d'analyser l'effet du CNPE une fois l'effet du changement climatique pris en compte, le tableau de données est divisé en 6 sous-tableaux. Ces derniers correspondent à 6 périodes d'échantillonnage différentes : 5 périodes de 5 années biologiques et une dernière période de 2 années biologiques. Ces 6 tableaux sont ensuite analysés par STATIS (« Structuration des Tableaux A Trois Indices de la Statistique » ; Escoufier, 1973 ; Lavit, 1988 ; Lavit et al., 1994) en les couplant par leurs colonnes (c'est à dire par les espèces).

La méthode STATIS permet d'analyser simultanément plusieurs tableaux liés par leurs colonnes (STATIS sur les **WD**), leurs lignes (STATIS sur les **VQ**) ou les deux. Cette méthode permet non seulement d'étudier la structure « moyenne » de ces tableaux (appelée compromis) mais également de comparer chaque tableau à cette structure commune. Pour ce faire, l'analyse se décompose en trois étapes principales. La première étape, dite de l'étude de l'« interstructure », permet d'évaluer la similarité des différents tableaux. Elle est basée sur l'analyse de la matrice **R** des *RV* entre couple de tableaux. Le *RV* est l'équivalent pour des tableaux du coefficient de corrélation entre deux variables. Pour deux tableaux  $\mathbf{X}_k$  et  $\mathbf{X}_j$  il est calculé selon :

$$RV(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_j) = \frac{\text{Cov}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_j)}{\sqrt{\text{Var}(\mathbf{X}_k)}\sqrt{\text{Var}(\mathbf{X}_j)}}$$

La diagonalisation de **R** fournit des valeurs propres et des vecteurs propres qui permettent d'évaluer la ressemblance entre tableaux.

Le premier vecteur propre fournit également les poids à attribuer aux différents tableaux dans la deuxième étape du STATIS : l'étude de l'« intrastructure ». Cette seconde étape correspond au calcul du compromis, une combinaison linéaire pondérée des différents tableaux. L'utilisation de ces poids permet de tenir compte de l'apport de chacun des tableaux à la description de la structure commune et de maximiser l'inertie du compromis.

Finalement, la troisième et dernière étape consiste à projeter les lignes et colonnes de chacun des différents tableaux sur le compromis.

L'effet du réchauffement de l'eau par le CNPE est évalué en comparant les coordonnées factorielles moyennes des différentes stations sur le compromis. La stabilité

temporelle des écarts entre stations influencées ou non par la centrale est évaluée par l'analyse de la projection des différents tableaux (ordonnés dans le temps par construction) sur le compromis.

### ***Effets du CNPE et espèces dites « marginales »***

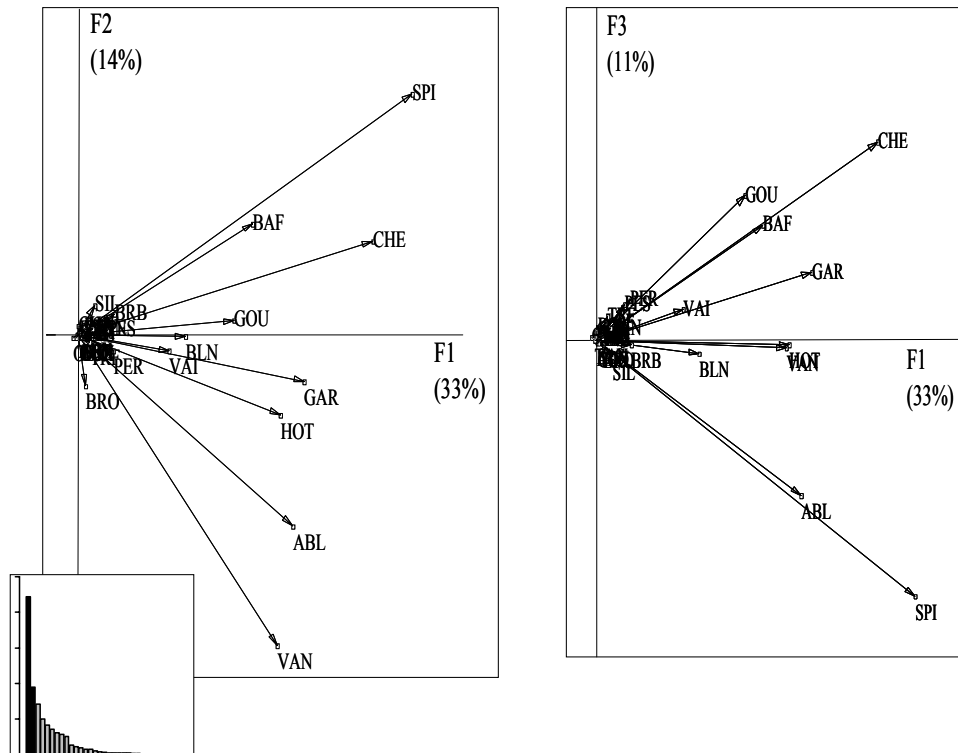
Les analyses précédentes sont réalisées par des Analyses en Composantes Principales (ACP) qui prennent en compte des différences d'abondance entre espèces. Les espèces les plus abondantes vont avoir un poids plus important dans l'analyse. En contre partie on peut omettre des modifications « fines » de la structure des peuplements, c'est à dire liées à des espèces peu abondantes ou « marginales » dans le jeu de données.

Dans un deuxième temps, l'étude est réalisée par des Analyses Factorielles des Correspondances (AFC), qui par un double centrage, par espèces et par pêche, permettent de gommer les différences d'abondances non seulement entre pêches mais également entre espèces. Ce dernier point est important dans l'interprétation des résultats dans la mesure où des espèces à très faibles occurrences/abondances peuvent avoir un poids important dans l'analyse. Pour limiter sensiblement cet effet, les espèces présentes dans moins de 5% des pêches sont écartées de l'analyse. De même, la station 8 est écartée du fait de sa composition spécifique particulière avec une forte représentation d'espèces comme l'ombre, le brochet ou le vairon (Roger et Capra, 2002). Une AFC incluant cette station, non présentée ici, a par ailleurs confirmé son poids très important dans ce type d'analyse. Comme pour l'ACP, dans un premier temps, nous réalisons une AFC sur le tableau global transformé en log, puis un STATIS sur AFC des 6 sous-tableaux.

### III. RESULTATS

#### 1. Modifications graduelles de la communauté de poissons

Au cours de la période d'étude 36 espèces, soit 74147 poissons ont été capturées. La variance inter-station ( $p < 0.001$ ) représente 10.4% de la variance totale du tableau des  $\ln(\text{CPUE}+1)$  centrés par espèce. En comparaison, les variances inter-annuelles et inter-saisons sont respectivement de 19.3 et 2.6% de la variance totale.

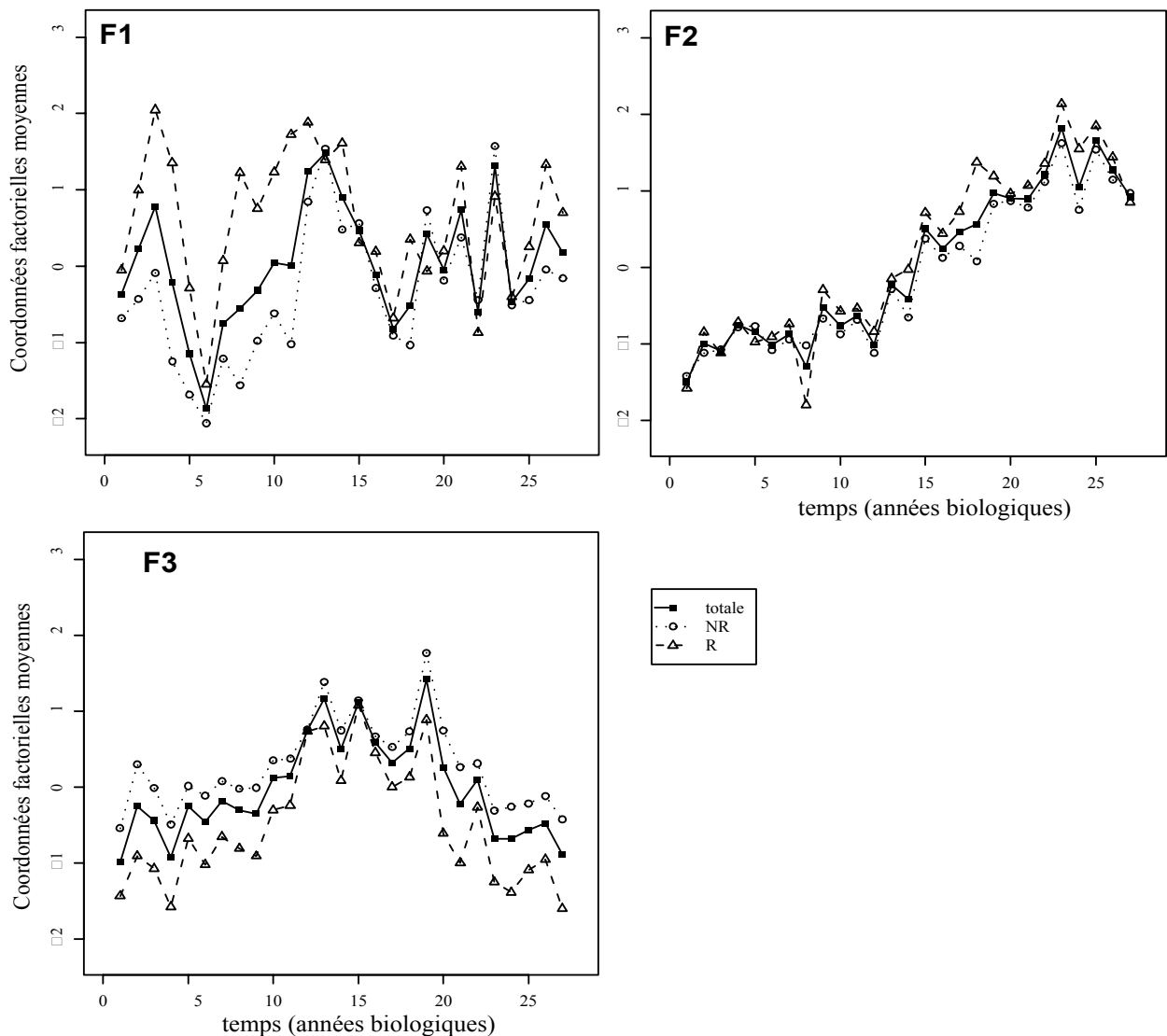


**Figure 3.** ACP sur  $\ln(\text{CPUE}+1)$  centrés par espèces. Coordonnées factorielles des espèces sur les plans factoriels F1-F2 et F1-F3.

Les trois premiers axes de l'ACP réalisée sur les CPUE par pêche et par espèce expliquent 58% de la variance totale (33%, 14% et 11% respectivement). Comme classiquement dans l'ACP, le premier axe est un axe d'abondance. Toutes les espèces y contribuent donc positivement (Figure 3), en particulier les 8 espèces dominant le peuplement à savoir l'ablette, le barbeau, le chevaine, le gardon, le goujon, le hotu, le spirin et la vandoise. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus précédemment (Daufresne et al. 2004) lors de l'analyse de la chronique (1979-1999). La chronique des coordonnées factorielles moyennes annuelles des stations présente une légère tendance à la croissance. On y met en évidence des grandes périodes de CPUE totale faibles (ex: année biologique 6) ou fortes (ex: année biologique 13) durant les 17 ou 18 premières années biologiques. Ces oscillations ont été attribuées à la variabilité du succès de la reproduction en regard de températures annuelles plus ou moins élevées (Daufresne et al., 2004), les fortes températures favorisant le recrutement de la plupart des cyprinidés. Au cours des dernières années, on constate le même phénomène mais avec une variabilité inter-annuelle qui semble beaucoup plus importante. Les tendances d'évolution apparaissent très similaires en amont et en aval des CNPE (Figure 4) même si les stations dites

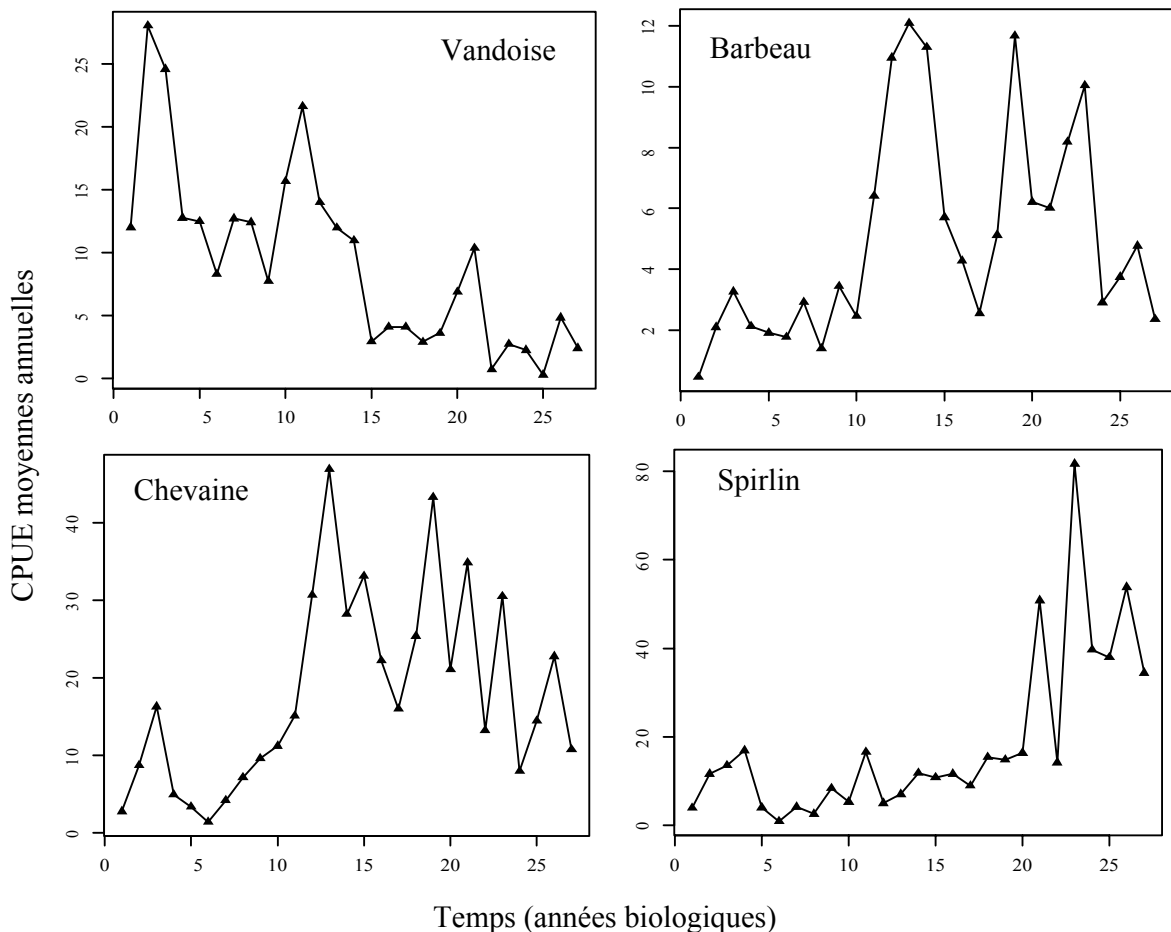


« réchauffées » présentent des abondances globales plus importantes au cours des premières années (1 à 12).



**Figure 4.** ACP sur  $\ln(\text{CPUE}+1)$  centrés par espèces. Chroniques des coordonnées factorielles moyennes annuelles des pêches sur les trois premiers axes factoriels. «NR »= stations non réchauffées et «R »= stations réchauffées.

Le deuxième axe oppose des espèces telles que le spirilin, le barbeau et le chevine à la vandoise et à l'ablette (Figure 3). Les chroniques des coordonnées factorielles moyennes annuelles des stations présentent une forte tendance, traduisant une domination graduelle du peuplement par le spirilin, le chevine et le barbeau aux dépens de l'ablette et de la vandoise (Figure 4, Figure 5). Sur les 21 premières années biologiques, ces résultats ont été attribués en grande partie aux effets du réchauffement climatique par Daufresne et al. (2004). Dans cette chronique plus longue, les tendances sont très proches avec cependant une contribution plus forte du spirilin. Les évolutions temporelles apparaissent extrêmement similaires en amont et en aval des CNPE (Figure 4).

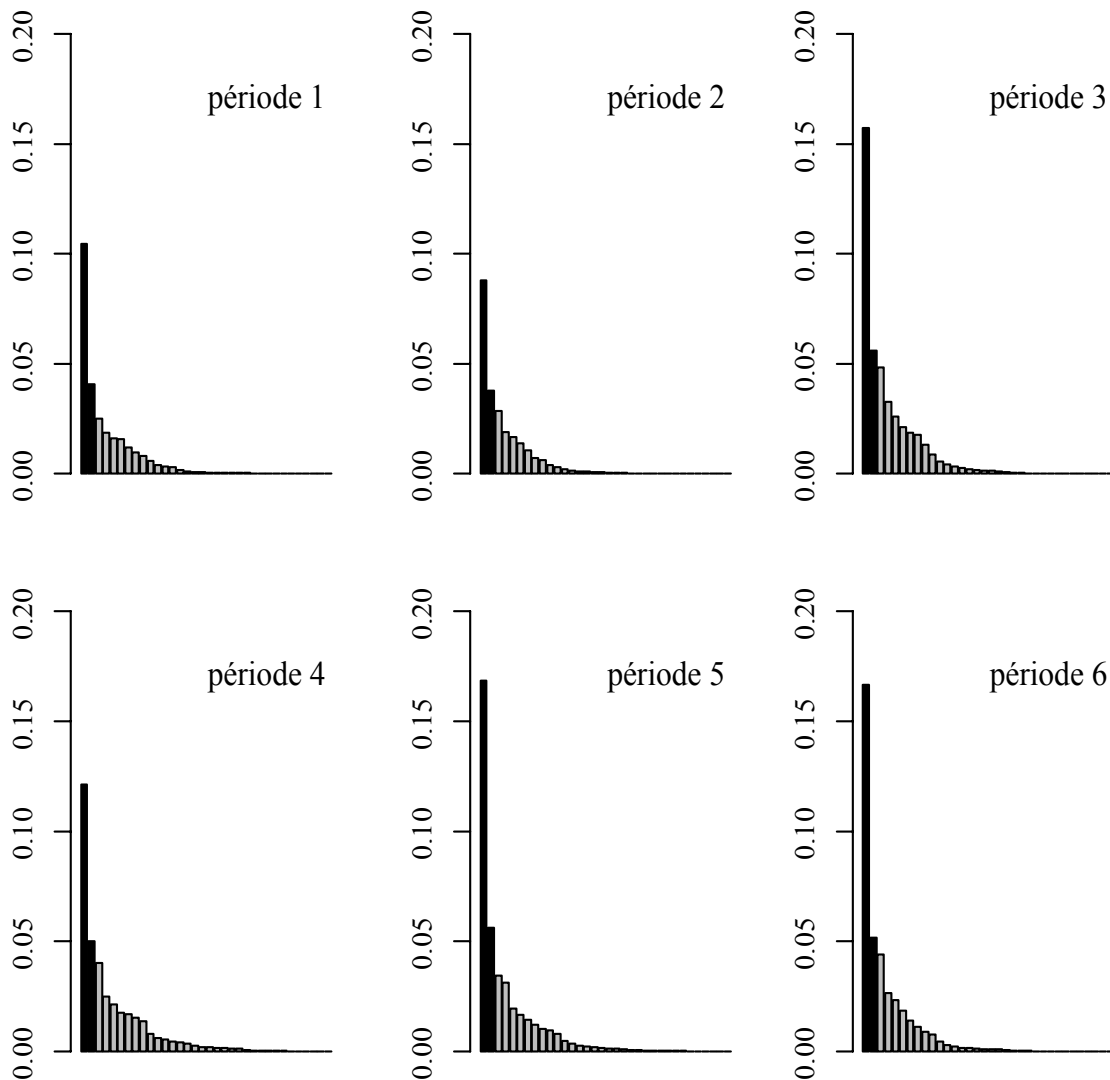


**Figure 5.** Moyennes annuelles des CPUE (non transformées en logarithmes) pour les 4 espèces les plus impliquées dans les modifications temporelles de la structure du peuplement.

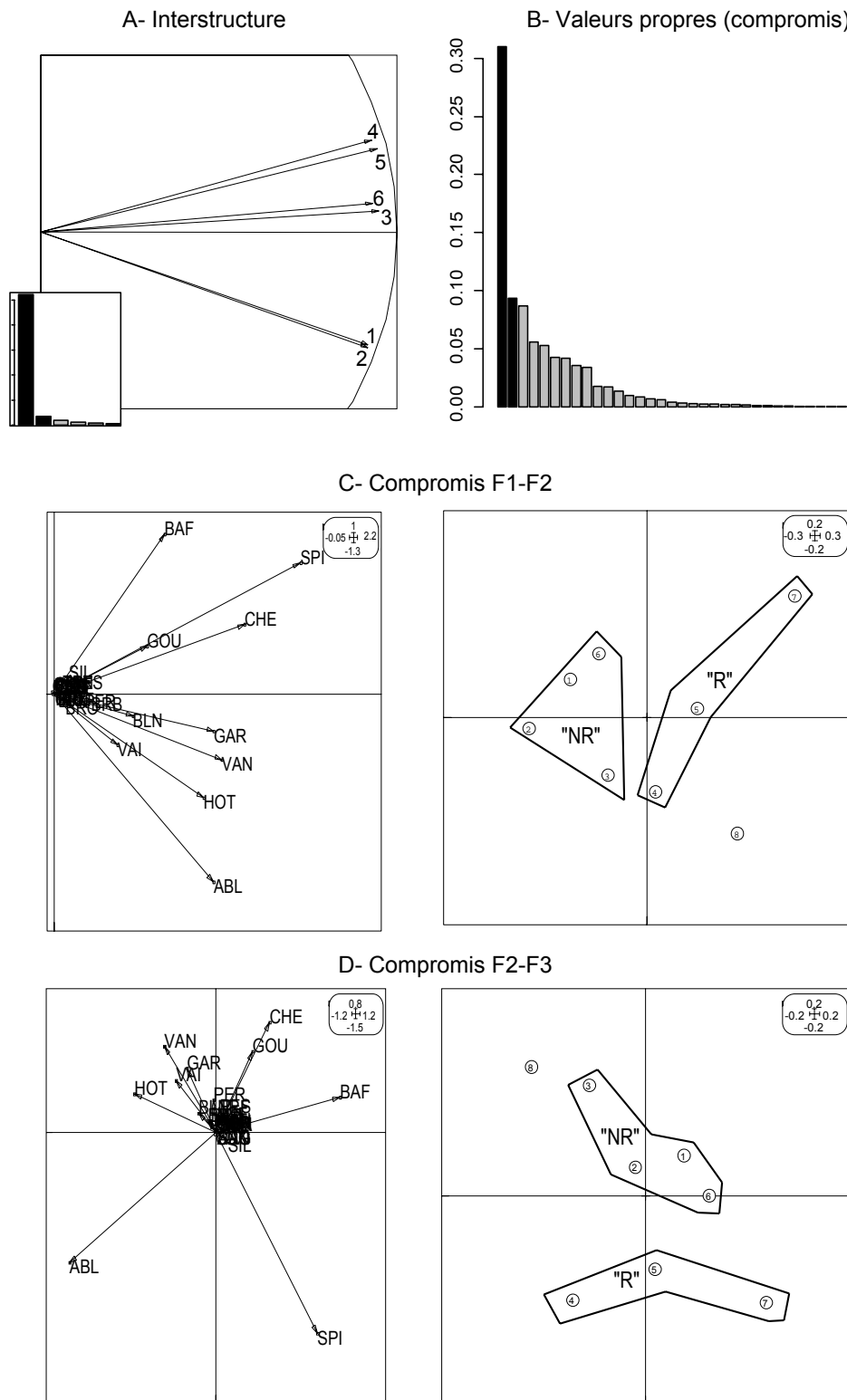
Le troisième axe oppose le barbeau, le goujon et le chevaine à l'ablette et au spirilin (Figure 3), mais principalement le chevaine au spirilin. Les chroniques des coordonnées factorielles moyennes annuelles des stations présentent une première phase de croissance (années 1 à 15) traduisant une augmentation des abondances relatives de chevaine par rapport à celles du spirilin (Figure 4). Cela est dû à une relative stabilité des abondances de spirilin sur les premières années de l'étude (Figure 5) alors que le chevaine tend à se développer. Nous observons ensuite une diminution des coordonnées factorielles. Cela traduit le développement rapide des abondances de spirilin au cours des 15 dernières années alors que celles de chevaine se stabilisent ou régressent légèrement. De façon constante sur l'ensemble de la période d'étude les coordonnées factorielles moyennes des stations « réchauffées » sont systématiquement inférieures à celles des stations « non-réchauffées » même si ce phénomène est moins marqué entre les années 12 et 19. Cela traduit des proportions de spirilin et d'ablette plus importantes dans les stations soumises au panache thermique chaud. La proportion moyenne de spirilin dans ces stations est en effet de 23% contre 10% dans les autres stations. La proportion de chevaine est quant à elle en moyenne de 23% dans les stations « réchauffées » contre 29% dans les « non-réchauffées ».

## 2. Effets du CNPE avec prise en compte des effets du réchauffement climatique

Les premiers axes des analyses séparées se distinguent fortement des autres axes (Figure 6). Les histogrammes des valeurs propres sont néanmoins légèrement différents avec 2 (pour la période 1) à 4 (pour la période 5) valeurs propres dominantes. Pour 4 des 6 périodes (périodes 2, 3, 4 et 6), la variabilité globale du peuplement est bien résumée par les trois premiers axes (58 à 67% de l'inertie totale).



**Figure 6.** Valeurs propres des ACP réalisées sur les tableaux des 6 différentes périodes (1 : 1979-1983 ; 2 : 1983-1988 ; 3 : 1988-1993 ; 4 : 1993-1998 ; 5 : 1998-2003 ; 6 : 2003-2004).



**Figure 7.** Interstructure et compromis de l'analyse STATIS sur ACP. A- coordonnées des 6 périodes sur l'interstructure (F1-F2). B- valeurs propres du compromis. C- Coordonnées factorielles des espèces et des stations sur le compromis (F1-F2). D- Coordonnées factorielles des espèces et des stations sur le compromis (F1-F3). «NR »= stations non réchauffées et «R »= stations réchauffées. Les polygones n'ont pas de valeur statistique ou mathématique.

Tableau I. Poids des différents tableaux (périodes) dans la construction du compromis de l'analyse STATIS sur ACP et cosinus carrés entre les différents tableaux et le compromis.

Tableaux (périodes) lignes	Poids	Cos <sup>2</sup>
1 : 1979-1983	4.027 e-0.1	0.730
2 : 1983-1988	4.025 e-0.1	0.703
3 : 1988-1993	4.154 e-0.1	0.803
4 : 1993-1998	4.067 e-0.1	0.731
5 : 1998-2003	4.137 e-0.1	0.839
6 : 2003-2004	4.083 e-0.1	0.841

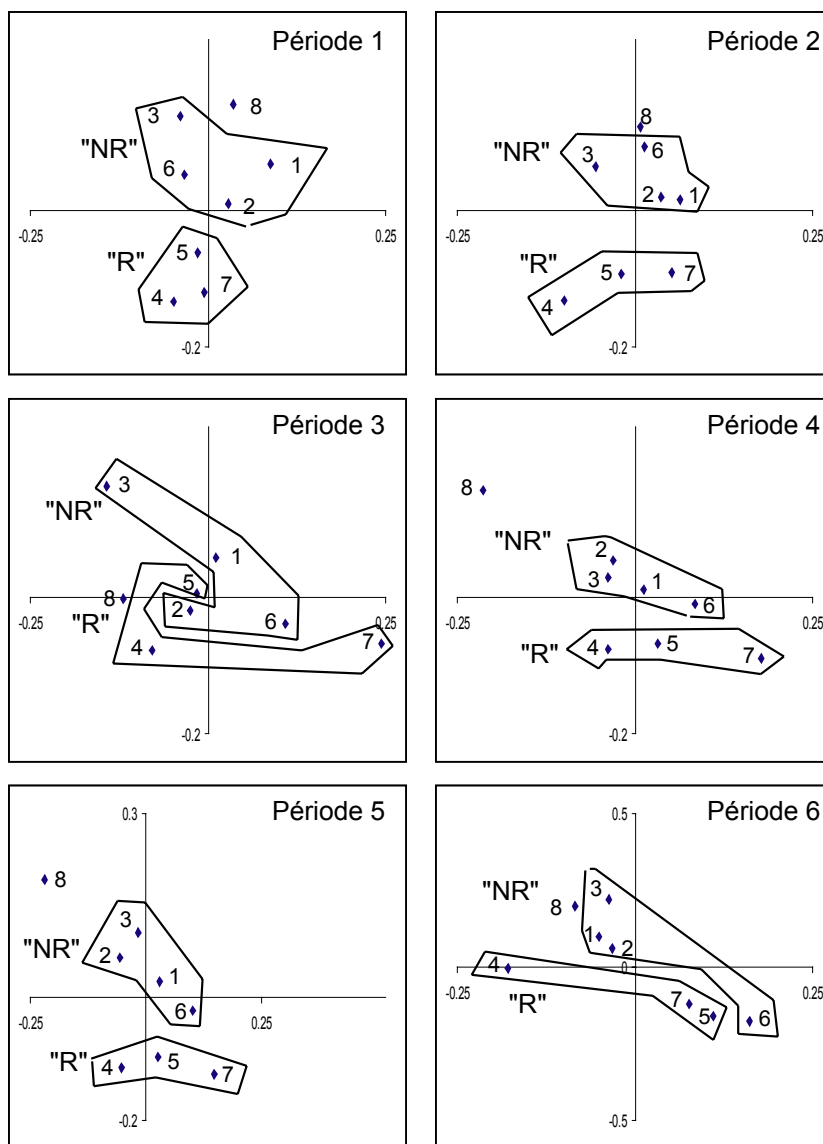


Figure 8. Coordonnées factorielles des stations sur le plan F2-F3 du compromis de l'analyse STATIS sur ACP pour les différentes périodes (1 : 1979–1983 ; 2 : 1983–1988 ; 3 : 1988–1993 ; 4 : 1993–1998 ; 5 : 1998–2003 ; 6 : 2003–2004). «NR» = stations non réchauffées et «R» = stations réchauffées. Les polygones n'ont pas de valeur statistique ou mathématique.

L'analyse de l'interstructure permet de distinguer clairement une première valeur propre isolée légitimant la poursuite de l'analyse (Figure 7). Les positions dans le plan F1-F2 sont assez homogènes et les 6 tableaux vont participer à la définition du compromis. Cela est confirmé par les poids, très stables, des tableaux dans la construction de ce compromis (Tableau 1). L'analyse des cosinus carrés entre les différents opérateurs et l'opérateur compromis reconstitué pour les 3 premiers axes permet également de noter que les 6 opérateurs présentent des similarités avec le compromis très fortes et comparables (Tableau 1).

Il est légitime de conserver les trois premiers axes du compromis (Figure 7). Ces trois premiers axes (résumant respectivement 36, 11 et 10% de l'inertie totale) sont globalement proches de ceux de l'analyse globale présentée plus haut. La structure des tableaux apparaît donc très stable dans le temps. Le premier axe est un axe d'abondance, le second oppose barbeau, spiralin et chevaine à l'ablette, la vandoise, le hotu. Ces deux premiers axes discriminent mal les stations soumises ou non au panache thermique de la centrale (Figure 7). L'axe F3 oppose le chevaine, la vandoise et le goujon à l'ablette et au spiralin et discrimine les deux types de stations. Comme démontré plus haut les proportions d'ablette et en particulier de spiralin semblent plus importantes dans les stations « réchauffées ». La projection des 6 sous-tableaux sur le compromis permet de constater que ce phénomène est globalement constant sur l'ensemble des périodes (Figure 8) même s'il paraît moins marqué pour les périodes 3 et 4, c'est-à-dire entre les années biologiques 11 et 20 (1988- 1998). Cela confirme les résultats précédents. On constate également que les types de stations sont peu différenciés au cours des deux dernières années. Finalement, dans toutes les analyses, la structure du peuplement de la station 8 semble proche des stations « non réchauffées ». Cela provient du fait que sa singularité réside dans un pool d'espèces globalement très peu représenté dans le jeu de données global.

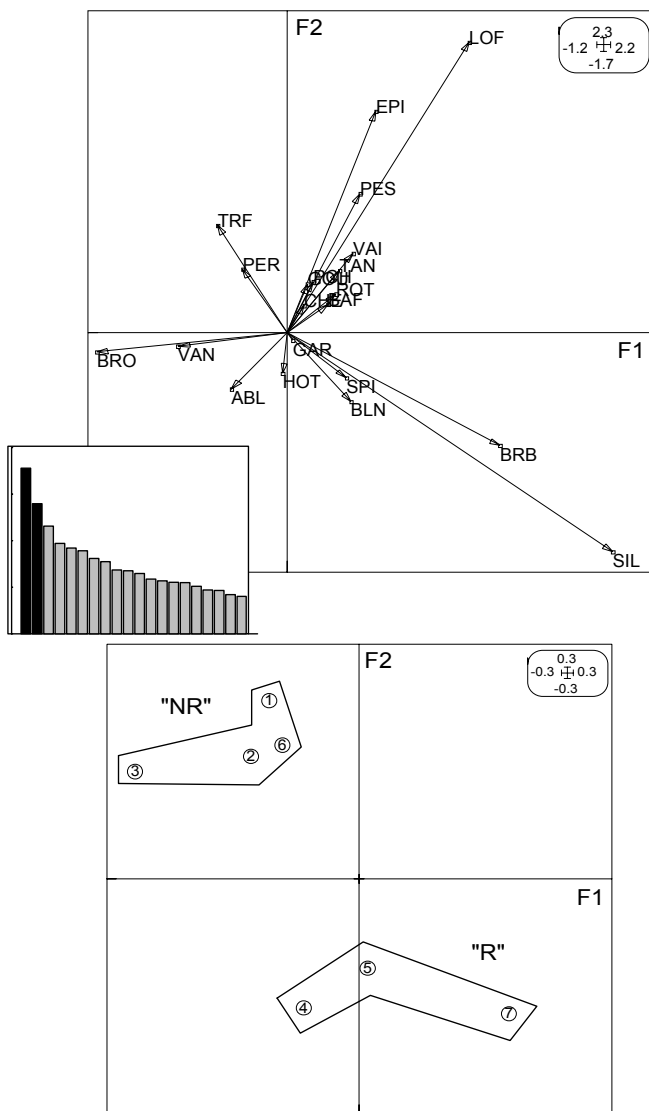
### **3. Effets du CNPE et espèces dites « marginales »**

#### ***Analyse factorielle des correspondances (AFC)***

La variance inter-station ( $p < 0.001$ ) représente seulement 6.3% de la variance totale du tableau type AFC (contre 17.6% pour l'inter-annuelle). Le tableau apparaît très peu structuré (Figure 9) et il paraît évident d'interpréter de ce fait les résultats avec prudence. On peut conserver 3 facteurs pour la suite de l'analyse. Les trois premiers axes n'expliquent que 28.5% de la variance totale (11.6%, 9.2% et 7.6% respectivement). Les deux premiers axes discriminent les stations « réchauffées » et « non réchauffées », en particulier l'axe F2. Cela traduit principalement des proportions plus importantes de loches, épinoches et de truites dans les stations « non réchauffées » et des proportions plus importantes de brèmes bordelières, blageons et de silures dans les stations « réchauffées » (Figure 10). Il est important de noter que les pourcentages d'occurrence ou de CPUE totales de certaines de ces espèces sont faibles (Tableau 2).

Les chroniques des cordonnées factorielles moyennes annuelles des différentes stations révèlent une tendance sur l'axe F1, traduisant une augmentation graduelle des proportions d'espèces telles que le silure, la brème bordelière ou la loche dans le temps (Figure 11). Il est intéressant de noter que le spiralin, le chevaine et le barbeau restent opposés sur cet axe à l'ablette et à la vandoise. L'augmentation des proportions de silure et de brème bordelière se retrouve sur l'axe F2. Cet axe nous permet de constater que ce phénomène est particulièrement marqué depuis l'année biologique 20 (1997-1998). Ces

évolutions temporelles sont très similaires dans les deux types de stations. On peut cependant noter qu'au cours du temps les stations « réchauffées » présentent des coordonnées factorielles moyennes systématiquement inférieures sur F2 (Figure 11).



**Figure 9.** Coordonnées factorielles des espèces et des stations sur le plan F1-F2 de l’AFC réalisée sur les  $\ln(\text{CPUE} + 1)$  par pêche et par espèces. «NR» = stations non réchauffées et «R» = stations réchauffées. Les polygones n’ont pas de valeur statistique ou mathématique.

**Tableau II.** Occurrence et somme des CPUE, exprimées en pourcentages (toutes stations confondues sauf la station 8). Les pêches de la station 8 ne sont pas prises en compte dans ce calcul.

Espèces	% occurrence	% abondance
Loche	5.8	0.1
Epinoche	6.8	0.1
Truite	29.3	0.6
Perche soleil	12.8	0.2
Ablette	59.6	9.0
Hotu	44.1	5.3
Spirlin	73.3	26.5
Blageon	13.4	0.9
Brème bordelière	9.9	0.5
Silure	6.3	0.2

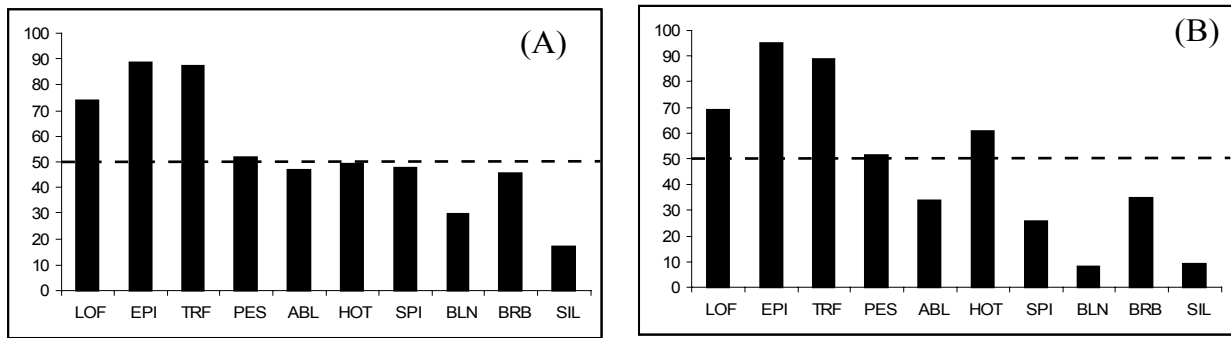


Figure 10. Pourcentages de l'occurrence (A) et de l'abondance (B) de 10 espèces dans les stations « non réchauffées ».

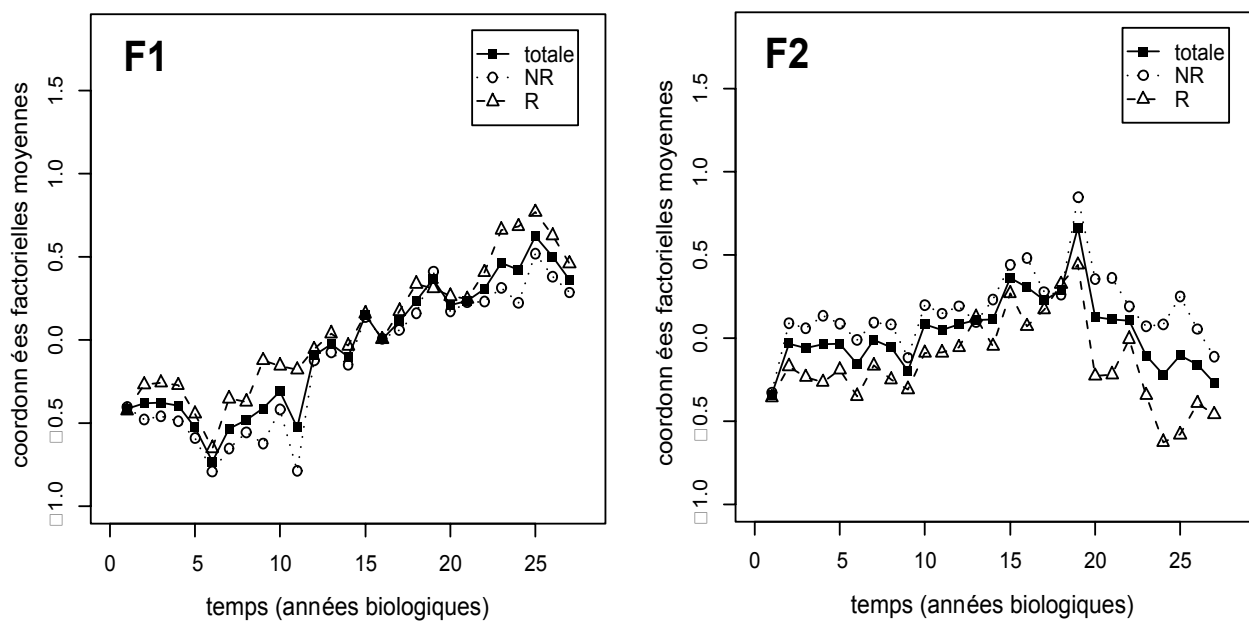
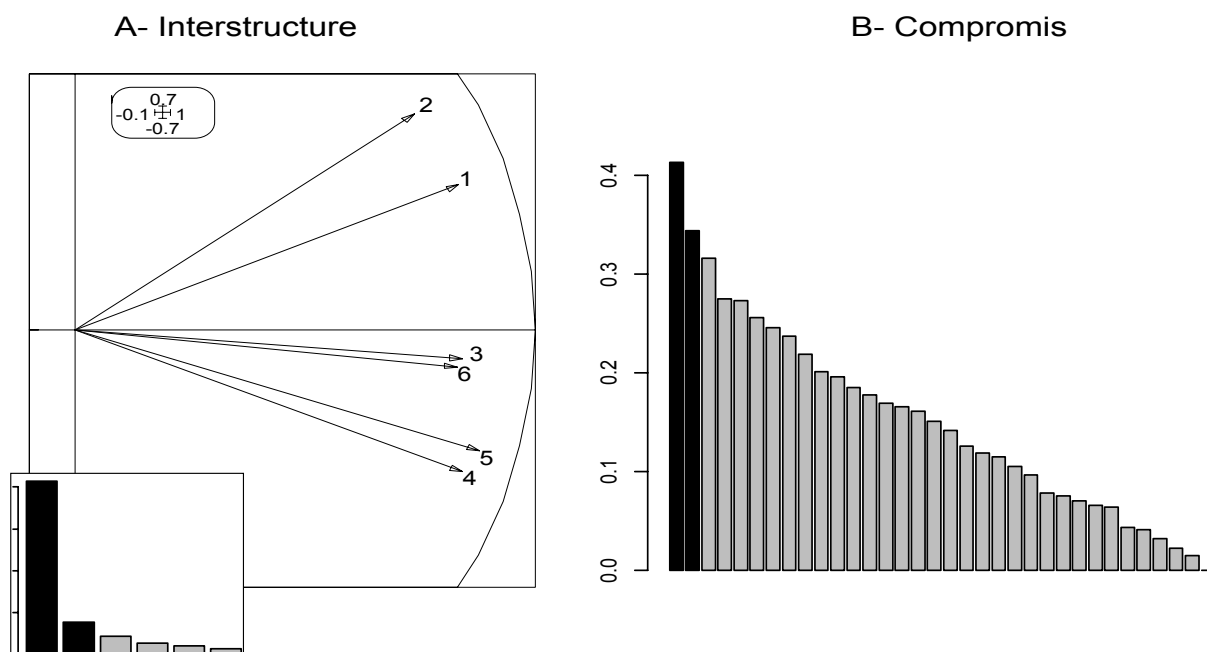


Figure 11. Coordonnées factorielles moyennes annuelles des pêches sur les axes F1 et F2 de l'AFC réalisée sur les ln(CPUE+1) par pêche et par espèces. «NR»= stations non réchauffées; «R»= stations réchauffées.

### STATIS sur AFC

L'analyse de valeurs propres des AFC réalisées sur les différents sous-tableaux a révélé de très faibles structurations (pas ou peu de valeurs propres se distinguant des autres). L'analyse de l'interstructure permet de distinguer clairement une première valeur propre isolée. Cependant le compromis ne présente pas de forte structure (Figure 12). L'analyse des cosinus carrés entre les différents opérateurs et l'opérateur compromis reconstitué pour les 3 premiers axes permet de noter que les 6 opérateurs présentent des similarités avec le compromis disparates et globalement peu marquées (Tableau 3). A la vue de ces éléments, l'analyse STATIS n'a pas été poussée plus avant.





**Figure 12.** Interstructure et compromis de l’analyse STATIS sur AFC. A- coordonnées des 6 périodes sur le plan F1-F2 de l’interstructure. B- valeurs propres du compromis.

**Tableau III.** Poids des différents tableaux (périodes) dans la construction du compromis de l’analyse STATIS sur AFC et cosinus carrés entre les différents tableaux et le compromis.

Tableaux (périodes)	lignes	Poids	Cos <sup>2</sup>
1 : 1979-1983	136	4.113 e-0.1	0.115
2 : 1983-1988	116	3.631 e-0.1	0.164
3 : 1988-1993	117	4.148 e-0.1	0.267
4 : 1993-1998	116	4.145 e-0.1	0.409
5 : 1998-2003	119	4.335 e-0.1	0.408
6 : 2003-2004	45	4.090 e-0.1	0.357

## IV. DISCUSSION

### 1. Evolution temporelle du peuplement du Rhône dans le secteur de Bugey

La modification de structure du peuplement de poissons au cours du temps est l'effet majeur enregistré avec la chronique des pêches sur le Rhône à Bugey. Ce peuplement devient progressivement dominé par le chevaine, le barbeau et le spirlin aux dépens de l'ablette et de la vandoise. Plus récemment, la proportion relative du spirlin s'est encore accrue fortement. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse forte d'un réchauffement climatique général, puisque le spirlin est une espèce « sudiste » pour le site de Bugey (Daufresne et al., 2004) et à caractère thermophile. Sa domination n'est pas seulement observée à Bugey mais également sur d'autres sites (Daufresne et Boët, 2005) et en Belgique (Ovidio, comm. pers.). Ces modifications de structure dues aux espèces principales sont également décelables pour des espèces plus marginales. On constate ainsi un développement du silure, de la brème bordelière et de la loche franche aux dépens du brochet. Le silure est une espèce exogène dont le développement pourrait être favorisé par le réchauffement climatique. La brème bordelière est une espèce sudiste et thermophile qui tend aussi à se développer sur de nombreux autres sites (Loire, Rhône, Seine ; Daufresne et Boët, 2005).

### 2. Effet du CNPE Bugey

On travaille sur des faibles proportions d'inertie totale des tableaux (10% ou moins), soit une inertie deux à trois fois moins importante que l'inertie inter-annuelle. Ces limites étant rappelées, on constate que :

- les proportions de spirlin et d'ablette sont plus importantes dans les stations réchauffées,
- parmi les espèces plus marginales du peuplement, il existe des proportions plus importantes de blageon, brème bordelière, silure dans les stations réchauffées,
- toujours parmi les espèces plus marginales du peuplement, il existe des proportions plus importantes d'épinoche, truite et loche franche dans les stations non réchauffées,
- les effets du réchauffement imputables au CNPE semblent globalement constants dans le temps.

En accord avec les connaissances sur les exigences thermiques des poissons, les espèces favorisées dans le panache chaud sont sans surprise des espèces plus thermophiles. Parallèlement, en amont de la centrale, se capturent encore des espèces d'eau froide (truite, loche, épinoche). Il est difficile de conclure si leur présence est due à des apports plus ou moins réguliers depuis des zones plus amont et plus fraîches, à l'existence de refuges plus froids (afférences phréatiques par exemple), ou à un habitat plus favorable. L'interprétation ne peut être plus poussée sans que soient renseignées les différences d'habitat physique entre les stations, qui s'expriment d'autant plus que le débit est bas, voisin de 200 m<sup>3</sup>/s, valeur plus souvent atteinte quotidiennement ces dernières années.

## RÉFÉRENCES

- Cattanéo F., G. Carrel, N. Lamouroux, P. Breil** (2001). Relationship between hydrology and cyprinid reproductive success in the Lower Rhône at Montélimar, France. *Archiv Für Hydrobiologie* **151**: 427-450.
- Daufresne M., M.C. Roger, H. Capra, N. Lamouroux** (2004). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhone River: effects of climatic factors. *Global Change Biology* **10**: 124-140.
- Daufresne M. & P. Boët** (2005). *Evolution temporelle de la structure des peuplements piscicoles de grands fleuves français*. EDF, 19 pp.
- Daufresne M. & P. Boët** (soumis). The effects of global warming overtake non-climatic disturbances of fish communities.
- Escoufier Y.** (1973). Le traitement des variables vectorielles. *Biometrics* **29**: 750-760.
- Grenouillet G., B. Hugueny, G. Carrel, J.M. Olivier, D. Pont** (2001). Large-scale synchrony and inter-annual variability in roach recruitment in the Rhône River: the relative role of climate factors and density-dependent processes. *Freshwater Biology* **46**: 11-26.
- IPCC** (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lavit C.** (1988). *Analyse conjointe de tableaux quantitatifs*. Masson, Paris.
- Lavit C., Y. Escoufier, R. Sabatier, & P. Traissac.** (1994). The ACT (STATIS method). *Computational Statistics and Data Analysis* **18**: 97-119.
- Roger M.C. & H. Capra** (2002). *Surveillance hydrobiologique du site du Bugey. Données recueillies au cours de l'année 2001*. EDF/ Cemagref, 42 pp.