
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Analyse statistique du fonctionnement
hydroécologique des boires de Loire : mise en
relation des facteurs mésologiques et biologiques.

SARL RIVE

Agence Centre – Val de Loire

11 Quai Danton 37500 CHINON



Tuteur entreprise :
Michel BACCHI
Cogérant de la SARL RIVE

Alice GRELL
IMA

2019-2020

Tuteur académique :
Pierre PEETERS

RESUME

Les annexes hydrauliques font parties des zones humides qui sont en relation étroite avec des cours d'eau comme c'est le cas des boires de Loire. Cependant, les espèces aquatiques présentes au sein des boires sont soumises à de multiples menaces d'origine naturelles ou anthropiques comme les étiages sévères, les espèces envahissantes ou encore le comblement.

Dans l'optique de restaurer le fonctionnement naturel des boires entre Nantes et Angers, le conservatoire des espaces naturels des pays de la Loire souhaite établir un suivi des peuplements de macroinvertébrés et de poissons avant la réalisation de travaux de restauration. Aussi dans le cadre du Contrat pour la Loire et ses annexes, s'étalant de 2015 à 2021, la SARL RIVE a pour mission de mener un suivi afin d'établir un état initial avant travaux.

Pourtant, 4 ans après le début de l'étude, il apparaît que les données biologiques seules ne suffisent plus à constituer un suivi complet. C'est pourquoi depuis 2018, la caractérisation des boires et donc les données concernant le milieu sont affinées, et mis en relation avec le suivi des peuplements.

Le but de ce stage a donc été de rechercher et d'appliquer des traitements statistiques permettant d'identifier et de hiérarchiser les facteurs issus du milieu expliquant au mieux la structure des peuplements aquatiques. Cette identification permettra par la suite d'orienter des projets de restauration adaptés.

À la suite d'un traitement statistique multivariée, il apparaît donc que d'un point de vue habitationnel, le substrat retrouvé en surface semblent être certes, le facteur le plus influençant, mais il n'explique pas en totalité le cortège faunistique des boires.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toute l'équipe de la SARL RIVE pour m'avoir chaleureusement accueilli et accompagné tout le long de ce stage.

Un grand merci à Jérémie Blémus et François Colas avec qui j'ai pu participer à la collecte des inventaires faunistiques sur le terrain (pêches électriques et IBG), et apprendre à caractériser les boires.

Enfin merci à Michel Bacchi de m'avoir permis de réaliser ce stage malgré les conditions sanitaires particulières de cette année, de m'avoir aidé dans l'élaboration du rapport et de m'avoir aiguillé sur les nombreuses méthodes statistiques utilisées en écologie aquatique.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE DU STAGE.....	3
2.1. Présentation de la structure d'accueil	4
2.1.1. La société RIVE	4
2.1.2. L'équipe.....	4
2.1.3. Les compétences de RIVE.....	4
2.2. Présentation de l'étude.....	5
2.2.1. Objectif de l'étude et premiers résultats	5
2.2.2. Problématisation du sujet de recherche	7
3. LES METHODES D'ANALYSE DANS UN CONTEXTE MULTIVARIABLE	8
3.1. Étapes de recherche dans la littérature scientifique.....	9
3.1.1. Sélection des articles.....	9
3.1.2. Classement des articles	9
3.2. Les méthodes statistiques identifiées	9
3.3. Synthèse sur les méthodes d'analyses	11
3.3.1. L'Analyse Canonique des Correspondances (ACC) et l'analyse de redondance (RDA)	11
3.3.2. Le positionnement multidimensionnel non métrique (NMDS) et l'analyse en coordonnées principales (PCoA)	16
3.4. Conclusion sur les méthodes applicables pour les données des boires	20
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DES BOIRES :RESULTATS ET DISCUSSION	21
4.1. Mise en forme de la base de données	22
4.1.1. Les matrices du milieu.....	22
4.1.2. Les matrices faunistiques	22
4.2. Essais de traitements statistiques des peuplements des boires	24
4.2.1. Traitement par NMDS : confirmer les dissimilarités entre les boires	24
4.2.2. Traitement par RDA/ACC : identifier les variables environnementales explicatives	25
4.3. Intérêt des analyses mutlivariées dans le cadre des suivis des boires	28
4.3.1. Influence interannuelle sur les boires.....	28
4.3.2. Contribution des variables environnementales sur la structure des peuplements des boires	29
4.3.3. Critiques et points d'amélioration des modèles	30
5. CONCLUSION	31



1. INTRODUCTION

Ce stage intervient dans un contexte de suivi des peuplements de poissons et de macroinvertébrés aquatiques, au sein des annexes hydrauliques de la Loire entre Nantes et Angers. Ce suivi réalisé par le bureau d'étude RIVE depuis 2016, fait suite à une demande de la part du Conservatoire des Espaces Naturels (CEN) des pays de Loire, au sein du Contrat pour la Loire et ses annexes qui s'étale de 2015 à 2021.

L'objectif principal du stage a été de rechercher des méthodes d'analyse statistique des données des peuplements aquatiques, et leurs mise en relation avec les facteurs mésologiques des annexes. Ces analyses doivent apporter une meilleure compréhension du fonctionnement hydroécologique en identifiant les facteurs du milieu les plus influençants au sein de ces annexes hydrauliques appelées boires.

Un autre objectif a consisté à participer aux différentes activités de l'entreprise et ainsi acquérir de l'expérience professionnelle au sein d'un bureau d'étude spécialisé en milieux aquatiques.

Au sein de RIVE mes missions ont été multiples. Premièrement, le stage a consisté dans la mise en place d'une synthèse bibliographie. Le but ici, a été de rechercher les méthodes d'analyse statistique les plus utilisées dans la littérature scientifique lors de suivis biologiques, et d'études d'impacts de facteurs environnementaux sur les peuplements. Cette étape a été réalisé en télétravail étant donné que le stage a débuté à distance pour des raisons de sécurité sanitaire.

Par la suite, la grande majorité du stage a consisté à expérimenter un traitement statistique adéquat des données disponibles du suivi de RIVE, via des méthodes statistiques identifiées issues de la littérature scientifique.

Ensuite, j'ai eu l'occasion de participer à la récolte de données et donc, de voir comment sont établis les bases de données faunistiques pour l'année 2020, sous la forme de pêches électriques (IPR) et de prélèvements de macroinvertébrés (IBG).

Enfin, en plus des prélèvements biologiques, ma mission a consisté à caractériser les boires sur le terrain et donc à établir la base de données mésologiques de l'année 2020, puis à entrer sur excel les données et à numériser ces caractérisations sous forme de cartes à l'aide d'un logiciel SIG.

Ce rapport débutera donc par une présentation brève de l'environnement dans lequel j'ai travaillé et le contexte du suivi, puis sera présenté les méthodes d'analyses statistiques utilisées pour le traitement des données qui seront visualisées et discutées dans la partie suivante, avant de terminer par une conclusion.



2. CONTEXTE DU STAGE

2.1. Présentation de la structure d'accueil

2.1.1. La société RIVE

La société RIVE est un bureau d'étude de type SARL spécialisé dans la gestion des milieux aquatiques de types cours d'eau et zones humides. Fondée en 2000, RIVE possède des activités mêlant à la fois l'étude, le conseil et l'ingénierie.

Ces principaux domaines d'activité se compte au nombre de quatre, à savoir la continuité écologique et la restauration des cours d'eau par le génie écologique, basés à La Ferté Bernard dans le (72), mais aussi l'hydromorphologie et le diagnostic physique des cours d'eau ainsi que l'hydrobiologie basés à Chinon (37).

La société intervient dans toute la France et propose différents services allant de l'expertise scientifique à la maîtrise d'oeuvre ainsi que de la recherche et du développement.

Dans le cadre de mon stage j'ai intervenu dans le service hydrobiologique de RIVE qui réalise les diagnostics biologiques des environnements aquatiques.

2.1.2. L'équipe

Au cours de ce stage, j'ai été encadrée par Michel Bacchi, cogérant de la société et docteur en hydrobiologie. Pour mener à bien ses projets, RIVE est aussi constitué :

- D'un ingénieur hydromorphologue et spécialiste SIG
- De deux ingénieurs hydrobiologistes
- D'un chargé d'étude en hydrobiologie
- D'une technicienne supérieure en milieux aquatiques
- D'une secrétaire du bureau d'étude

Durant ces 4 mois de stage, j'ai donc eu l'opportunité de travailler avec la plupart des membres de l'équipe de RIVE en bureau mais aussi sur le terrain.

2.1.3. Les compétences de RIVE

RIVE possède au total 8 compétences lui permettant d'être opérationnel en matière de gestion des milieux aquatiques :

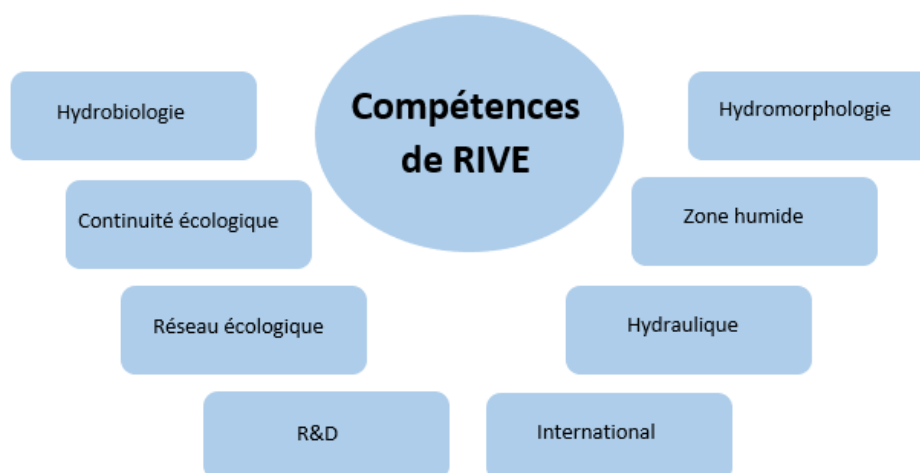


Figure 1 Récapitulatif des différentes compétences chez RIVE.

2.2. Présentation de l'étude

2.2.1. Objectif de l'étude et premiers résultats

Une boire est le nom local donné aux annexes hydrauliques que l'on retrouve sur la Loire. D'après le Glossaire eau & milieux aquatiques (www.glossaire-eau.fr), les annexes hydrauliques sont définies comme un « ensemble de zones humides alluviales en relation permanente ou temporaire avec le milieu courant par des connections soit superficielles soit souterraines : îles, bancs alluviaux, bras morts, prairies inondables, forêts alluviales, ripisylves, sources et rivières phréatiques. Ces espaces constituent d'importantes zones de transition entre le milieu terrestre et le milieu aquatique ». Toujours d'après le Glossaire, ces zones accolées directement à un cours d'eau ont leur importance dans la survie de certaines espèces puisque ce sont « des zones de reproduction, de repos migratoire ou encore des aires de nourrissage ».

Selon le rapport d'expertise du Contrat pour la Loire et ses Annexes de 2016 à 2018 (Colas et Bacchi, 2019), au total ce sont une vingtaine de boires entre Nantes et les environs d'Angers qui ont fait l'objet d'une caractérisation (description complète de la méthode expliquée en Annexe 1) et d'un suivi biologique par RIVE.

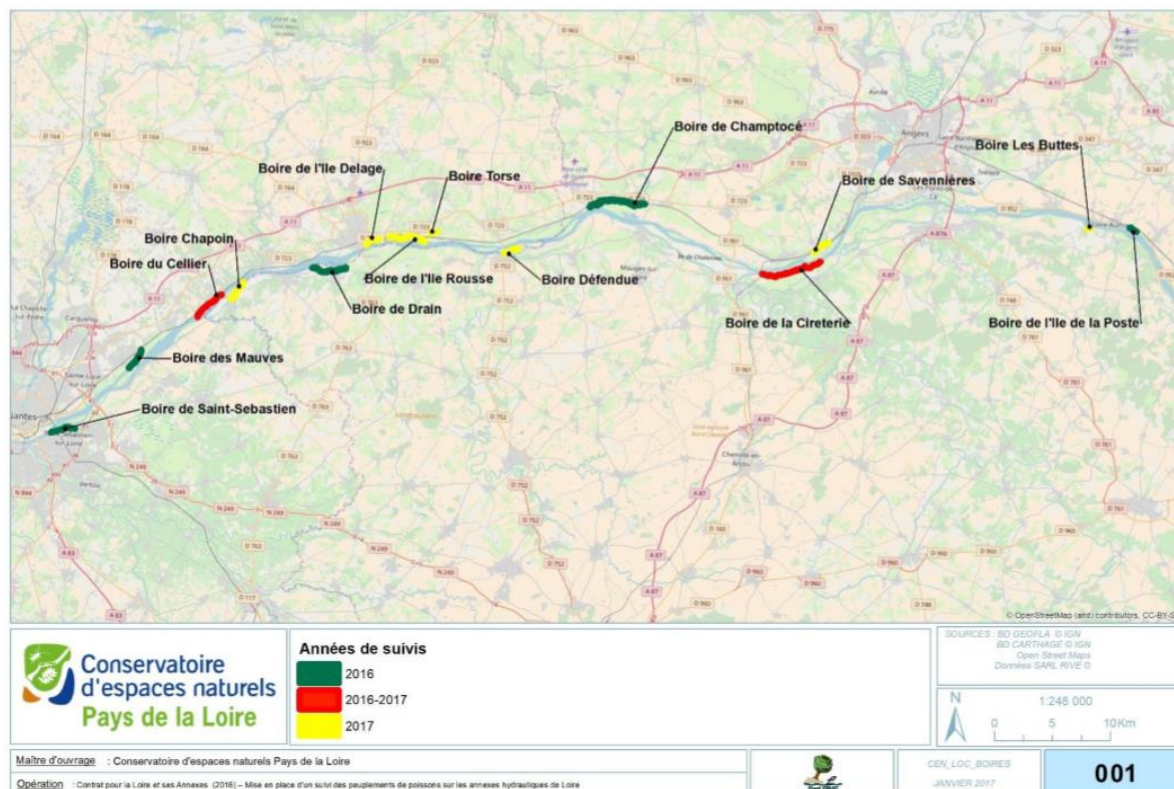


Figure 2 Localisation des différentes boires de Loire étudiées en 2016, 2017, 2018 et 2019 (Colas et Bacchi, 2019)

Les boires étudiées peuvent avoir des aspects et des fonctionnements hydro-sédimentaires très différents. Celles situées plus en aval par exemple, sont soumises à l'influence de la marée alors que d'autres peuvent être aussi alimentées par des cours d'eau. Avec l'influence du bouchon vaseux à l'estuaire, certaines boires sont majoritairement vaseuses ou au contraire être en grande partie sableuse. De plus, en fonction du niveau de connexion à la Loire, certaines annexes sont totalement déconnectées en période estivale ou être menacées d'atterrissement lorsque la végétation aquatiques devient envahissante. Enfin, Les boires peuvent présenter des faciès et des écoulements divers au sein d'un même site.

De plus, en fonction des conditions climatiques, le niveau d'eau des annexes a montré des grandes variations suivant les années. Ainsi, la crue exceptionnelle de 2016 et le déficit hydrique important de 2017 ont fait grandement varier le moment de déconnection à la Loire et la hauteur d'eau des boires, rendant parfois les prélèvements difficiles à effectuer.

Ainsi, dans le cadre du projet de restauration porté par le CEN, le suivi préalable possède un **double objectif** :

- Caractériser les « trajectoires écologiques » des boires pour comprendre comment les peuplements et l'état de la boire évoluent au cours du temps.
- Hiérarchiser les facteurs mésologiques impactant le plus les peuplements.

Dans sa finalité, le type de travaux à privilégier en fonction des boires sera orienté selon les facteurs identifiés (faut-il agir sur l'hydraulique ? la morphologie ? l'habitat ?...).

Les techniques d'inventaire et de suivi normalisées pour les milieux fluviaux n'ont pas pu être appliquées avec les boires (du fait de la grande variation hydraulique qu'elles peuvent subir). Des méthodes plus adaptées comme la pêche électrique et des prélèvements au surber ou avec des substrats artificiels, ont donc été mises en place pour assurer un suivi pré et post-travaux efficace. Enfin, chaque site d'étude a été caractérisé suivant une méthode mise en place par RIVE. Cette caractérisation s'est concentrée sur les facteurs hydrauliques et habitationnels des annexes.

➤ Suivi piscicole

La collecte de données sur le peuplement piscicole a été réalisée par pêche électrique. Le protocole est donné en Annexe 2.

En terme de richesse spécifique, il apparaît que le nombre d'espèces peut grandement varier suivant les boires (de 4 à 16). La présence de sites avec peu d'espèces peut s'expliquer par des raisons hydrauliques. En effet, suite à la décrue de 2016, un abaissement important en oxygène a entraîné la mort de nombreuses espèces piscicoles. Cependant, les plus représentées au niveau des boires soumises à la marée sont les épinoches, alors que les sites avec une végétation dense et des eaux plutôt stagnantes, sont les bouvières et les gardons (avec des moyennes de densité pour 100 m² pouvant varier de 0,8 à 122).

Plusieurs espèces migratrices ont pu être répertoriées sur les boires notamment l'anguille avec un gradient croissant de la taille des individus de l'aval vers l'amont de la Loire et un taux de colonisation des boires dépendante de la connectivité à la Loire. Le flet est aussi retrouvé dans les boires connectées à la Loire et ayant une influence de la marée. Enfin le brochet est retrouvé dans 8 boires.

Enfin, plusieurs espèces dites « indésirables » ont été observées lors des suivis, majoritairement le poisson chat et la perche soleil ainsi que deux espèces d'écrevisses exotiques (l'écrevisse de Louisiane et l'écrevisse américaine).

➤ Suivi des macroinvertébrés

Les prélèvements des macroinvertébrés ont été réalisés par une méthode classique au surber (IBG-DCE NF T 90-333 septembre 2016 principe donné en Annexe 3), mais aussi par une méthode mise en place par RIVE utilisant des substrats artificiels. Cette dernière méthode a été abandonnée en 2018 en raison des conditions hydrauliques de certaines boires qui ne laissaient pas aux invertébrés le temps de coloniser les substrats car celles-ci s'asséchaient trop rapidement.

Les résultats du suivi des macroinvertébrés semblent être très différents suivant les années. Par exemple, les notes IBGN varient de 5 à 12 en 2016, puis baissent de 3 à 7 en 2017. La variété taxonomique aussi tend à varier, notamment durant l'année de déficit hydrique grave en 2017 où le nombre de taxon passe de 20 à 8.

Suivant la liste faunistique établie et les premières analyses statistiques, il apparaît que les différences de composition entre les boires dépendent du type de faciès (courant ou stagnant) et du degré de connectivité à la Loire.

2.2.2. Problématisation du sujet de recherche

La partie 2.2.1 avait pour but de résumer le cadre et les résultats des suivis des peuplements aquatiques des boires issus du rapport d'expertise de Colas et Bacchi (2019). Il apparaît que la faune aquatique soit sous l'influence de plusieurs facteurs mésologiques, mais que les analyses utilisées lors de l'étude ne semblent pas suffisantes pour expliquer la structure des peuplements.

Ainsi, il paraît intéressant d'analyser comment, dans la littérature scientifique, les auteurs traitent ce genre de données lorsqu'ils souhaitent étudier l'impact des facteurs mésologiques sur les peuplements.

Cette recherche bibliographique cible deux objectifs principaux :

- Premièrement : Quels sont les impacts des facteurs mésologiques ou des travaux sur les peuplements aquatiques ? à savoir : macrofaune benthique, poissons, oiseaux, amphibiens, reptiles et macrophytes.
- Deuxièmement : Comment mettre en relation les facteurs mésologiques et les peuplements aquatiques ? Quelles sont les techniques d'analyse statistiques utilisées dans ces études qui permettent de hiérarchiser les facteurs mésologiques les plus significatifs ?

Cette synthèse bibliographique a essentiellement pour but de rechercher des exemples d'utilisation de méthodes de traitement de données. Les résultats des articles sont donc peu discutés dans ce rapport.



3. LES METHODES D'ANALYSE DANS UN CONTEXTE MULTIVARIABLE

3.1. Étapes de recherche dans la littérature scientifique

3.1.1. Sélection des articles

Au total, 38 articles ont été sélectionnés parmi les sources bibliographiques de Google Scholar, de la bibliothèque numérique de l'Université de Tours, de Web Of Science et à partir de la bibliographie de certains articles. Pour cibler les articles j'ai donc effectué des recherches par mots clés que l'on peut retrouver dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 Démarche de recherche des articles dans la littérature scientifique.

Mots clés	Bibliographie d'articles	Nombre d'articles trouvés
abiotic factors on macroinvertebrates population	/	4
abiotic factors on macroinvertebrates communities	/	4
environmental factors on biological aquatic communities	/	3
impacts of restoration projects on aquatic communities	/	8
impacts of restoration projects on birds communities	/	6
/	OUI	13

Les articles retenus ont été choisis en fonction de la pertinence de leur titre et après lecture des résumés.

3.1.2. Classement des articles

Les références des articles sont conservées sur ZOTERO ainsi que dans une base de données SQL type PHPmyAdmin. Ce type de base de données permet de faciliter l'organisation et la recherche des données récoltées. Au final les informations importantes propres à chaque article ont été ordonnées comme suit et sont disponibles en Annexe 4 :

- Le Titre
- Le(s) auteur(s)
- L'année de publication
- Le DOI
- Le(s) peuplement(s) étudié(s)
- Les facteurs mésologiques qui ont été rangés en plusieurs catégories
- Le(s) type(s) d'analyse(s) statistique(s) utilisé(s)
- Des mots clés issus des articles

3.2. Les méthodes statistiques identifiées

Le tableau suivant présente les méthodes relevées dans la littérature scientifique qui sont utilisées pour l'analyse multivariées de données biologiques et mésologiques :

Tableau 2 Méthodes d'analyse identifiées dans la littérature scientifique.

Méthode d'analyse	Nombre d'articles concernés
Régressions généralisées (GLM, GLMMs)	9
Analyse canonique des correspondances (ACC)	8
Analyse des correspondances détrencées (DCA)	8

Positionnement multidimensionnel non-métrique (NMDS)	6
Analyse en composantes principales (ACP)	6
Régressions linéaires simples et multiples (SLR, MLR)	6
Analyse de redondance (RDA)	3
Analyse en coordonnées principales (PCoA)	1
Autres	11

La catégorie « autres » comprend des techniques d'analyse de type ANOVA particulières (Permanova, NPMANOVA...), des tests de multicollinéarité, des modèles d'arbre de régression et de classification, ou encore des algorithmes et des systèmes de machine learning. Enfin, certains articles de type review quant eux ne présentent pas de méthodes d'analyses.

On constate ainsi que la grande majorité des analyses utilisées appartiennent aux « méthodes d'ordination ».

Selon Legendre (2019), l'ordination est un arrangement d'objets permettant de les représenter dans un espace de faible dimension appelé *diagramme de dispersion multivariable* (diagramme à 2 ou 3 axes). Ainsi, suivant le nombre de variables et leur type (réponse ou explicative), il est possible de faire un choix sur la méthode à utiliser entre les méthodes d'ordination dites « directes » de gradient et celles dites « indirectes » de gradient. En règle générale, les variables explicatives font souvent référence aux variables environnementales ou abiotiques et les variables réponses correspondent à la réponse biologique des individus ou peuplements.

Response variable(s) ...	Predictor variable(s)	
	Absent	Present
... is one	distribution summary	regression models <i>sensu lato</i>
... are many	unconstrained ordination (PCA, CA, DCA, NMDS)	constrained ordination
	cluster analysis	unconstrained ordination with supplementary variables
		discriminant analysis (CVA)

Figure 3 Présentation des types de modèles statistiques multivariés de Šmilauer et Lepš (2014). Les méthodes indirectes de gradient apparaissent dans le cadre jaune alors que les méthodes directes de gradient apparaissent dans le cadre rouge.

Dans la partie suivante, deux grandes méthodes à savoir l'ACC/RDA et le NMDS, sont présentées sous forme de fiches descriptives issues du centre de support du site XLSTAT, qui est un formidable lieu d'information sur le fonctionnement des méthodes statistiques. Le reste des fiches est disponible en Annexe 6.

Ajouté à cela, le site fournit aussi une grille d'aide permettant de déterminer la méthode statistique la plus adaptée en fonction du type de problématique et de données à disposition (Annexe 5).

Enfin, la présentation sur les méthodes d'ordination de Hérault et Rossi (2013), a aussi été d'une aide dans la compréhension de ces méthodes.

3.3. Synthèse sur les méthodes d'analyses

3.3.1. L'Analyse Canonique des Correspondances (ACC) et l'analyse de redondance (RDA)

3.3.1.1. Fiche descriptive de l'ACC

➤ Présentation de la technique

L'**ACC** ou Analyse Canonique des Correspondances, est le modèle unimodal des techniques d'analyse directes de gradient (aussi appelées analyse à ordination sous contrainte).

But : Ce type d'analyse est utilisé lorsque « les espèces sont directement reliées à des facteurs environnementaux mesurés » (Hérault et Rossi, 2013). En d'autres termes, cette méthode d'ordination est utile lorsque l'on souhaite étudier la variabilité dans la composition d'une communauté expliquée par un jeu de variables environnementales (ter Braak, 1986).

➤ Présentation du jeu de données

Pour utiliser une ACC, le jeu de données doit être organisé sous la forme de tableaux de contingence (ou matrice associée de données covariées) :

- Un premier tableau correspondant aux relevés biologiques de p objets (l'abondance ou la fréquence des espèces), sur n sites ou stations.
- Un second tableau correspondant aux mesures mésologiques de q variables descriptives ou explicatives sur les mêmes n sites. La significativité des variables est appréciée préalablement par un test de permutation.

Ces tableaux peuvent contenir des données qualitatives, quantitative voir semi-quantitative lorsque les données sont rangées par classe.

➤ Particularités de la méthode

Les données quantitatives (d'abondance par exemple) peuvent être transformées ($\log x + 1$ ou rangées selon des classes), pour éviter la sureprésentativité de certaines espèces.

Techniques pouvant s'associer à l'ACC :

- L'analyse factorielle des correspondances (**AFC**).
Objectif : faciliter l'interprétation des résultats du premier tableau des données biologiques (« obtenir une visualisation simultanée des sites et des objets en deux ou trois dimensions » XLSTAT) que l'on retrouve dans l'inertie de l'ACC non-contrainte.
- La régression des moindres carrés partiels (PLS).
Objectif : réduction du nombre de variables explicatives avant de lancer une ACC.

On parle d'**ACC partielle** lorsqu'un troisième tableau de contingence contenant les variables explicatives dont on veut supprimer l'effet est ajouté au jeu de données.

➤ Représentation graphique des résultats

Les résultats d'une ACC sont visualisables sous la forme d'un diagramme de distribution sur lequel les sites et les espèces sont représentées par des points et les variables environnementales par des flèches.

L'interprétation de ce diagramme est proche de celui d'un diagramme biplot (ACP). Ainsi, on retrouve la dimension F1 en horizontal et la dimension F2 à la vertical.

En fonction de la direction des flèches, il est possible d'identifier les corrélations négatives et positives. Ainsi, deux flèches pointant dans le même sens seront positivement corrélées alors que deux flèches pointant dans des sens opposés seront négativement corrélées. Enfin, la corrélation est absente lorsque deux flèches présentent un angle droit entre elles.

La relation espèces-sites avec les variables environnementales s'effectue suivant la distribution des points espèces et sites de part et d'autre des flèches. Enfin, la longueur des flèches donnent des indications quant à l'importance de la variable environnementale.

3.3.1.2. Fiche descriptive de la RDA

➤ Présentation de la technique

La **RDA** ou « Redundancy Analysis », est le modèle linéaire des techniques d'analyse direct de gradient (aussi appelé analyse à ordination sous contrainte).

But : Même objectif que l'analyse canonique des correspondances.

Quelle différence entre l'ACC et la RDA ? Dans la RDA les liens entre les variables réponses et variables explicatives sont **supposés linéaires**, alors qu'ils sont supposés unimodaux dans l'ACC.

➤ Présentation du jeu de données

Pour utiliser une RDA, le jeu de données doit être organisé sous la forme de tableaux de contingence (ou matrice associée de données covariées), comme pour l'ACC :

- Un premier tableau correspondant aux relevés biologiques de p objets (l'abondance ou la fréquence des espèces), sur n sites ou stations.
- Un second tableau correspondant aux mesures mésologiques de q variables descriptives ou explicatives sur les mêmes n sites. La significativité des variables est appréciée préalablement par un test de permutation.

Ces tableaux peuvent contenir des données qualitatives, quantitative voir semi-quantitative lorsque les données sont rangées par classe.

➤ Particularités de la méthode

Les données quantitatives (d'abondance par exemple) peuvent être transformées ($\log x + 1$ ou rangées selon des classes), pour éviter la sureprésentativité de certaines espèces.

Une RDA peut s'accompagner d'une analyse en composantes principales (ACP) pour faciliter l'interprétation des résultats du premier tableau des données biologiques (« obtenir une visualisation simultanée (biplot) des observations et des variables en deux ou trois dimensions. » XLSAT).

Comme avec l'ACC, il est possible d'effectuer une **RDA partielle** pour supprimer l'effet de certaines variables descriptives.

➤ Représentation graphique des résultats

Les résultats d'une RDA sont visualisables sous la forme d'un diagramme de distribution sur lequel les espèces sont représentées par des flèches et les variables environnementales par des symboles pour les variables qualitatives et des flèches pour les variables quantitatives.

L'interprétation du diagramme est assez similaire à celui de l'ACC et suit les « biplot rules » (Šmilauer et Lepš, 2014).

XLSTAT affiche sous forme d'un tableau les « scores » des variables explicatives. Ces scores correspondent aux coordonnées des variables visualisables sur les axes du plot. Ce tableau permet donc d'identifier les facteurs les plus importants selon les axes (sachant que l'axe 1 porte en général le plus d'informations).

3.3.1.3. Exemples d'application de la méthode

➤ Application ACC XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT qui fournit de nombreux tutoriels pour l'utilisation des statistiques multivariées. Toutes les informations, données, tableaux et diagrammes proviennent du tutoriel sur le site <https://help.xlstat.com>.

Tableau 3 Jeu de données ACC du tutoriel XLSTAT.

	Insect1	Insect2	Insect3	Insect4	Insect5	Insect6	Insect7	Insect8	Insect9	Insect10	Altitude	Humidity	Dist. to lake
Site1	15	26	20	9	5	7	32	47	19	17	460	72	350
Site2	19	46	39	15	5	7	36	44	42	18	465	80	350
Site3	29	13	9	12	1	26	29	31	37	27	465	65	340
Site4	47	34	46	14	3	25	7	27	46	49	470	69	320
Site5	18	37	43	20	0	10	22	19	48	35	460	75	310
Site6	32	44	28	24	39	2	2	11	10	0	455	79	300
Site7	8	47	9	33	7	7	23	3	21	17	450	82	300
Site8	31	24	12	42	11	17	46	9	8	35	450	82	280
Site9	32	20	48	46	25	18	6	4	35	38	450	81	280
Site10	19	43	26	47	24	7	23	10	1	27	445	83	200
Site11	12	40	13	30	3	8	5	15	5	18	440	85	120
Site12	11	35	8	31	28	12	6	22	19	19	440	85	100

Les données du tableau ci-dessus correspondent aux comptages en 12 différents sites de 10 espèces d'insectes dans une région tropicale. Un second tableau (affiché en rouge) comprend 3 variables quantitatives décrivant les 12 sites (altitude, humidité, et distance au lac).

But : Déterminer si les trois variables descriptives peuvent aider à expliquer les comptages observés pour les différentes espèces d'insectes.

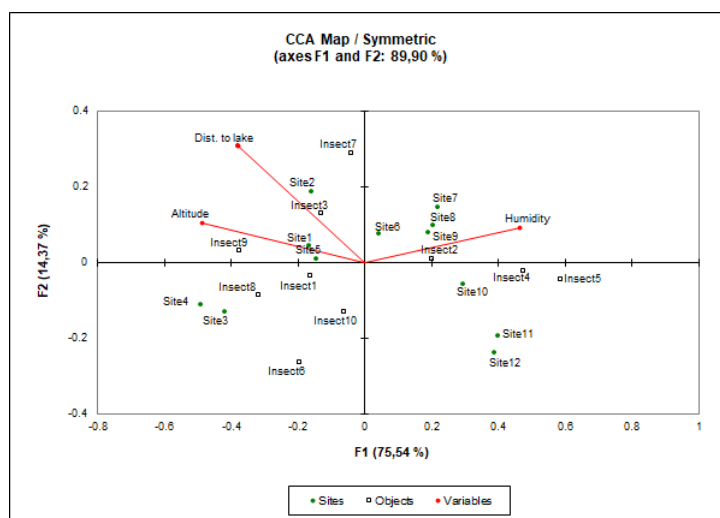


Figure 4 Résultats de l'ACC représentant les espèces, les sites et les variables sur un même graphique.

On peut voir sur ce graphique que pour les espèces Insect4 et Insect5 les effectifs élevés sont associés à un taux d'humidité élevé et une faible altitude. L'espèce Insect7 semble plus sensible à la distance au lac. L'espèce Insect9 semble préférer une altitude élevée, et plus encore une humidité plus faible.

➤ Application RDA XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT :

Tableau 4 Extrait du jeu de données RDA du tutoriel XLSTAT.

Planlanc	Poaprat	Poatriv	Ranufam	Rumeacet	Sagiproc	Salirepe	Scorautu	Trifprat	Trifrepe	Viciliath	Bracruta	Callicusp	Soil Thickness	Management
0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.8	SF
0	4	7	0	0	0	0	5	0	5	0	0	0	3.5	BF
0	5	6	0	0	0	0	2	0	2	0	2	0	4.3	SF
0	4	5	0	0	5	0	2	0	1	0	2	0	4.2	SF
5	2	6	0	5	0	0	3	2	2	0	2	0	6.3	HF
5	3	4	0	6	0	0	3	5	5	0	6	0	4.3	HF
5	4	5	0	3	0	0	3	2	2	0	2	0	2.8	HF
0	4	4	2	0	2	0	3	0	2	0	2	0	4.2	HF
0	4	5	0	2	2	0	2	0	3	0	2	0	3.7	HF
3	4	4	0	0	0	0	3	0	6	1	2	0	3.3	BF
3	4	0	0	0	2	0	5	0	3	2	4	0	3.5	BF
0	0	4	0	2	4	0	2	0	3	0	4	0	5.8	SF
0	2	9	2	0	2	0	2	0	2	0	0	0	6	SF
0	0	0	2	0	0	0	2	0	6	0	0	4	9.3	NM
0	0	0	2	0	0	0	2	0	1	0	0	4	11.5	NM
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	5.7	SF
2	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	4	NM
3	3	0	0	0	0	3	5	0	2	1	6	0	4.6	NM
0	0	0	0	0	3	3	6	0	2	0	3	0	3.7	NM
0	0	0	4	0	0	5	2	0	0	0	4	3	3.5	NM

Les données correspondent aux abondances de 30 espèces de plantes (en colonnes) sur 20 sites (en lignes) dans des communautés de dunes. Les noms des espèces sont la concaténation des 4 premières lettres du genre et des 4 premières lettres de l'espèce, en latin. Les sites sont également décrits par deux variables environnementales en colonnes (en rouge) :

- Épaisseur du sol : variable quantitative, profondeur de l'horizon A1 dans le sol.
- Gestion : variable qualitative avec les niveaux AB (Agriculture Biologique), AL agriculture de Loisir), GN (Gestion de Conservation de la Nature) et AS (Agriculture Standard).

But : Examiner les relations linéaires entre le type de gestion et l'épaisseur de l'horizon A1 du sol sur des communautés de plantes de dunes grâce à l'Analyse de Redondance.

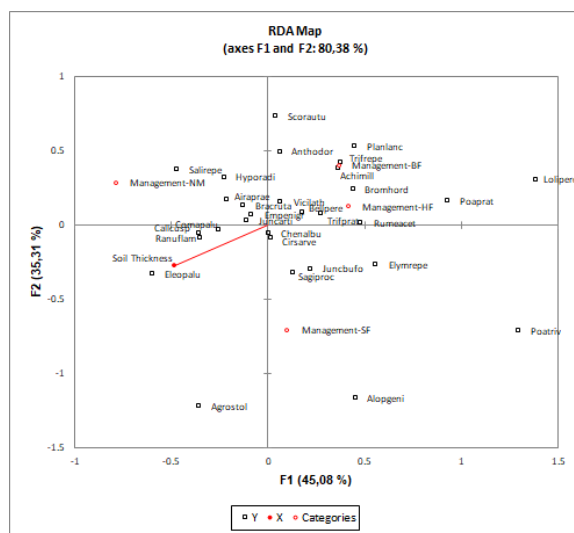


Figure 5 Résultats de la RDA sous forme de triplot incluant les espèces et les variables.

Sur un axe de RDA donné, seules les observations et variables réponses associées à des cosinus carrés élevés doivent être interprétées.

L'axe 1 semble être lié aux deux variables explicatives, avec la gestion de conservation de la nature à gauche et une épaisseur de l'horizon A1 du sol importante à gauche ; et les agricultures de loisir et biologique à droite.

La gestion de Conservation de la Nature est donc liée à un horizon A1 important dans les sols. Ces environnements sont caractérisés par les espèces *Eleocharis palustris*, *Ranunculus flammula*, *Salix repens* et d'autres. D'un autre côté, des sols plus fins sont liés à l'agriculture biologique et de loisir avec une abondance spécifique relativement importante de *Lolium perenne* et *Poa pratensis*.

L'axe deux est lié à l'agriculture standard, caractérisée par *Alopecurus geniculatus*.

➤ Application dans la littérature scientifique

On remarque parmi les techniques relevées dans la littérature scientifique, l'utilisation importante de l'analyse canonique des correspondances (ACC), très semblable à l'analyse de redondance (RDA). Par exemple, Fonnesu, Sabetta, et Basset (2005) appliquent une ACC pour comprendre les relations entre les données de densité de chaque taxons de macroinvertébrés et les variables environnementales de l'étude.

L'utilisation de l'une ou de l'autre se décide en grande partie via une **analyse des correspondances détendancées** ou « Detrended Correspondence Analyses » en anglais abrégé **DCA** (Rae, 2013 ; Esselman et Allan, 2010 ; Cai, Gong, et Qin, 2011 ; Karaouzas *et al.*, 2019 ; Kalogianni *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2003). Wang *et al* (2003) par exemple, utilisent cependant dans leur étude à la fois une ACC et une RDA. Ainsi, pour analyser l'importance de leurs variables environnementales (bassin-versant, cours d'eau et rive) sur les données d'occurrence et d'abondance des poissons, ils appliquent une ACC. Cependant pour analyser les variables environnementales sur les traits caractéristiques des communautés, cette fois une RDA est privilégiée.

Le logiciel CANOCO semble être le logiciel prédominant pour la réalisation de ces analyses (Fonnesu, Sabetta, et Basset, 2005 ; Mereta *et al.*, 2012 ; Rae, 2013 ; Marzin, Verdonshot, et Pont, 2013 ; Cai, Gong, et Qin, 2011 ; Karaouzas *et al.*, 2019 ; Kalogianni *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2003 ; D'Ambrosio *et al.*, 2009).

Dans plusieurs cas (D'Ambrosio *et al.*, 2009 ; Esselman et Allan, 2010 ; Wang *et al.*, 2003 ; Marzin, Verdonshot, et Pont, 2013 ; Rae, 2013), les auteurs procèdent à une analyse des données en plusieurs étapes :

- Une normalisation des données faunistiques par une transformation $\log(x+1)$ pour éviter la sur-représentativité de certaines espèces.
- Une étape de validation des variables environnementales par une analyse de corrélation (Coefficients de Pearson ou Spearman).
- Une étape d'analyse de la significativité des variables par un test de permutation (Monte Carlo permutation) et/ou une régression linéaire (D'Ambrosio *et al.*, 2009).
- L'analyse ACC ou RDA par l'intermédiaire d'un logiciel, tel que CANOCO qui est souvent cité.
- Une dernière étape de partitionnement de la variance qui associe selon les valeurs propres ou Eigen values, des pourcentages de variation selon les variables environnementales.

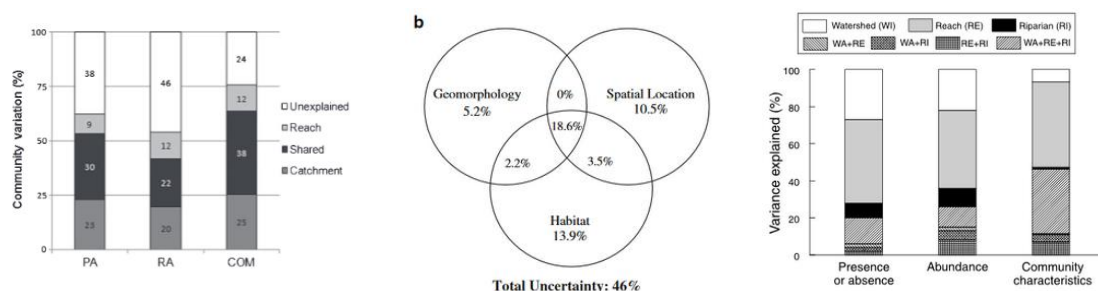


Figure 6 Représentations différentes des pourcentages de variation expliqués issues de Esselman et Allan (2010), D'Ambrosio *et al.* (2009) et Wang *et al.* (2003)

Pour identifier les variables les plus explicatives, certains articles proposent aussi d'utiliser des arbres de classification et de régression (CART) permettant de mettre en place des modèles prédictifs de présence ou d'absence des espèces comme pour Mereta *et al* (2012).

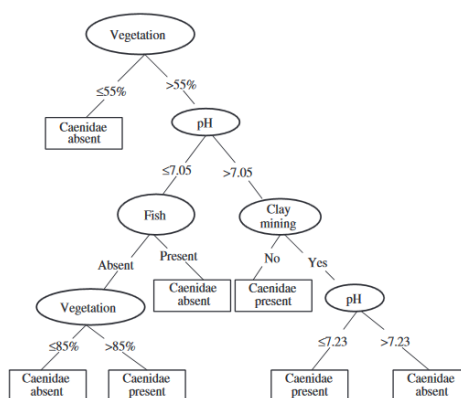


Figure 7 Modèle CART d'arbre de prédiction d'occurrence issu de Mereta et al (2012)

3.3.1.4. Application possible de la méthode pour les données des boires ?

L'ACP et la RDA semblent être des méthodes intéressantes pour répondre à la problématique d'identification des variables environnementales influençant les peuplements aquatiques.

À la lecture des articles scientifiques retenus, il apparaît indispensable de réaliser une DCA pour identifier le type de lien unimodal ou linéaire, entre les matrices des variables explicatives et des variables réponses.

Suite à cela, il pourrait être envisagé de suivre une démarche similaire à celle relevée dans la littérature scientifique à savoir : 1. Transformation/normalisation des données brutes (sachant que les abondances par taxon peuvent passer de un individu à plusieurs centaines pour les macroinvertébrés) ; 2. L'analyse des corrélations des variables ; 3. Un test de significativité des variables environnementales choisies/identifiées ; 3. L'analyse ACC ou RDA et enfin, 4. Le partitionnement de la variance.

Les tableaux doivent être organisés en deux matrices de telle sorte que les données biologiques soient répertoriées par taxon et par données environnementales.

3.3.2. Le positionnement multidimensionnel non métrique (NMDS) et l'analyse en coordonnées principales (PCoA)

3.3.2.1. Fiche descriptive des méthodes

➤ Présentation de la technique

Le « Multidimensional Scaling » et le « Non Metric Multidimensional Scaling » (**MDS** ou **NMDS**), est un type d'analyse permettant de mettre sur un espace à 2 ou 3 dimensions, une matrice de proximité (matrice de distance) correspondant à des similarités ou des dissimilarités entre objets ou individus. Cette technique fait partie des analyses indirectes de gradient qui ne fait pas intervenir de variables « explicatives » mais uniquement une variable de type « réponse ».

But : Reconstituer une carte permettant la mise en évidence de similarités et de dissimilarités entre des objets ou des individus.

➤ Présentation du jeu de données

Le jeu de données des MDS se présente sous la forme d'une matrice de proximité avec les réponses des individus/objets.

➤ Particularités de la méthode

Il existe deux types de MDS :

- Le MDS métrique dans lequel les dissimilarités sont reproduit le plus fidèlement dans l'espace de représentation car les données sont continues. Le MDS métrique est aussi appelé **PCoA** pour « Principal Coordinates Analysis », lorsque l'on veut représenter des « objets décrits par une matrice carrée contenant des indices de ressemblance entre ces mêmes objets. » (XLSTAT).
- Le MDS non-métrique quant à lui traduit une relation d'ordre entre les dissimilarités (données semi-quantitatives).

➤ Représentation graphique des résultats

La représentation graphique la plus utilisée pour un MDS est une carte appelée configuration MDS, sur laquelle les relations de proximités entre les individus sont projetées dans un espace à 2 ou 3 dimensions.

Les diagrammes de Shepard permettent d'évaluer la qualité des résultats obtenus de l'analyse. En somme, plus les points sont alignés, plus la représentation est bonne.

3.3.2.2. Exemples d'application de la méthode

➤ Application MDS XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT :

Tableau 5 Jeu de données MDS issu du tutoriel XLSTAT.

	P1	P2	P3	P4	P5
Ind1	2	1	4	5	3
Ind2	3	1	2	5	4
Ind3	1	2	4	3	5
Ind4	3	2	4	5	1
Ind5	3	2	4	5	1
Ind6	2	1	3	5	4
Ind7	1	3	4	2	5
Ind8	3	1	2	4	5
Ind9	3	1	2	5	4
Ind10	1	4	5	2	1
Average	2.2	1.8	3.4	4.1	3.3

Les données proviennent d'une enquête menée auprès de 10 consommateurs, auxquels on a demandé de noter (notes comprises entre 1 et 5) cinq barres chocolatées, dont un seul est sur le marché (produit P1).

But : Montrer comment les produits se positionnent sur une carte, d'après les notes données par les 10 consommateurs.

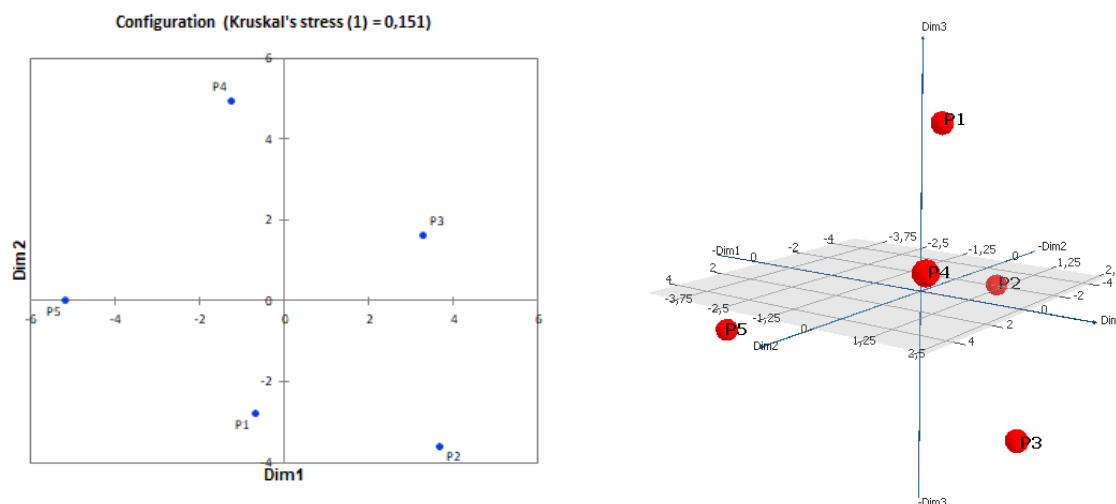


Figure 8 Résultats du MDS en 2D et en 3D (XLSTAT-3D plot) issus de XLSTAT.

Il apparaît ainsi que les consommateurs ont collectivement bien distingué l'ensemble des produits les uns des autres puisque les produits sont dispersés. Nous savons que le produit P2 contient plus de chocolat que le produit P4 qui est celui qui en contient le moins : ils apparaissent diamétralement opposés sur le graphique à 3 dimensions. Nous voyons que les consommateurs ont sensiblement favorisé le produit P2 dans leur notation. Nous voyons aussi d'après les figures ci-dessus que les produits P3 et P5, bien qu'ayant des notes moyennes très proches, ne sont pas proches dans l'espace de représentation. Les avis entre les consommateurs sont en effet parfois opposés sur les produits P3 et P5. Cela s'explique par un goût d'arachide dû à la présence de cacahuètes dans le produit P3, apprécié par certains consommateurs et pas par d'autres.

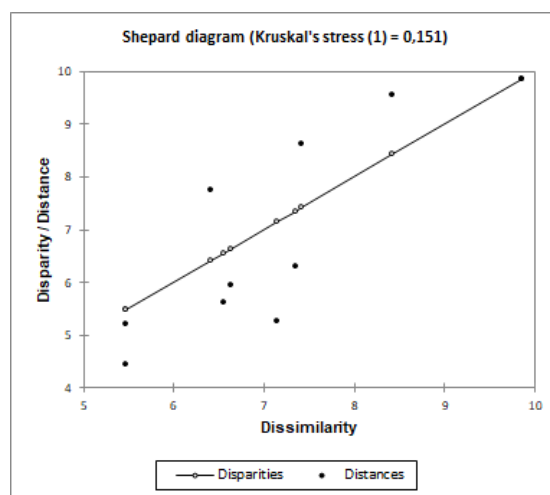


Figure 9 Evaluation de la qualité des résultats en 2D du MDS.

Plus les points sont dispersés, moins le graphique est fiable. Si la relation d'ordre au niveau des abscisses est respectée au niveau des ordonnées, le graphique est très fiable. Si les points sont alignés sur une droite, la représentation est parfaite.

Dans le cas de l'exemple, les points sont légèrement dispersés démontrant que la représentation 2D n'est pas suffisante pour visualiser correctement les liens de proximité.

➤ Application dans la littérature scientifique

Il apparaît que les techniques NMDS et PCoA sont utilisées dans les articles lorsque les auteurs cherchent à mettre en évidence des ressemblances ou des différences de compositions entre les communautés biologiques. Les auteurs veulent démontrer qu'il existe ou non des similitudes parmi les

communautés entre différents habitats (Cai, Gong, et Qin, 2011 ; Kalogianni *et al.*, 2017 ; Theodoropoulos *et al.*, 2017 ; Lechêne *et al.*, 2018 ; Höckendorff *et al.*, 2017), ou lorsque les conditions des sites changent (pressions anthropiques, projets de restauration ou conditions environnementales extrêmes) comme c'est le cas dans les études de Shirey *et al* (2016) et Bateman et Riddle (2020).

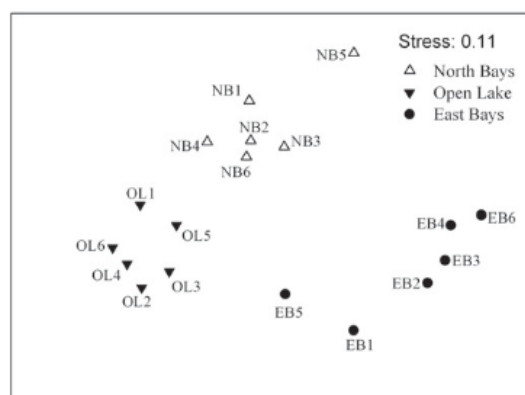


Fig. 7. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) of macroinvertebrate communities based on Bray-Curtis similarity coefficients, showing the spatial changes in community structure.

Figure 10 Résultats de l'analyse NMDS issus de Cai, Gong, et Qin (2011) montrant 3 habitats avec des communautés bien distinctes.

Les NMDS accompagnent souvent d'autres méthodes comme des arbres de régression type BRT (Theodoropoulos *et al.*, 2017) ou db-MRT pour « Distance-based multivariate regression tree » (Lechêne *et al.*, 2018) ainsi que des MLR et des ACP comme dans l'article de Bateman et Riddle (2020). Ces arbres ont pour objectif de prédire les réponses des variables biologiques en fonction des facteurs abiotiques étudiés.

Comparé aux autres articles, Höckendorff *et al* (2017) créent des clusters de réponses similaires du peuplement piscicole suite à un projet de restauration, et l'analysent au regard des traits bio-écologiques (qui remplacent ici les variables environnementales). Une PCoA est donc utilisée pour visualiser en 2D les résultats des analyses.

Le logiciel Primer est souvent revenu dans les articles (Cai, Gong, et Qin, 2011 ; Kalogianni *et al.*, 2017 ; Theodoropoulos *et al.*, 2017) lors de l'utilisation d'un NMDS.

Theodoropoulos *et al* (2017), précisent bien quelle transformation a été appliquée aux données pour approcher d'une loi Normale et respecter l'homoscedasticité (dispersion homogène des résidus). Les variables biologiques ont été mises sous racine carrée (square root transformed) et les données en pourcentage ont été transformées par un logarithme (log-transformed).

3.3.2.3. Application possible de la méthode pour les données des boires ?

Une technique de positionnement multidimensionnel pourrait être appliquée pour confirmer les analyses en composantes principales et les analyses factorielles, et ainsi mettre en évidence les boires qui se comportent d'une manière similaire vis-à-vis de leur composition faunistique.

La représentation dans l'espace ne correspondant pas à des distances observées dans la matrice, le positionnement multidimensionnel sera donc de type NMDS.

Le tableau présentant le jeu de données pourra être organisé de manière simple, avec en ligne les données des taxons (métriques biotiques) et en colonne les données par site.

Au besoin, les données pourront être normalisées si les variables ne suivent pas une loi Normale.

3.4. Conclusion sur les méthodes applicables pour les données des boires

Au total, deux voir trois types analyses pourraient être appliquées. Dans la partie suivante, il sera donc question de récupérer et d'organiser la base de données. Cette base de données est issue du suivi des années de 2016 à 2019, et est composée des listes faunistiques et des données abiotiques issues de la méthode CARHAB.

Ensuite ces données pourront être traitées par l'intermédiaire d'un logiciel de traitement statistique disponible comme XLSTAT. Ce logiciel a l'avantage d'être facile d'utilisation et d'avoir à disposition la majorité des méthodes envisagées. Cas particulier de l'analyse des correspondances détendancées (DCA), qui sera réalisée sous R étant donné que cette analyse est indisponible sur XLSTAT.

Tableau 6 Récapitulatif des méthodes d'analyses pour les données de l'étude des boires.

	Analyses déjà réalisées		Analyses envisagées	
	ACP	AFC + analyses inter-intraclasse	NMDS	(DCA)/ACC/RDA
Intérêt de la méthode	Analyses des boires en lien avec leur composition faunistique		Confirmer l'analyse des boires	Expliquer la composition des boires par les facteurs du milieu les plus explicatifs



4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DES BOIRES :RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Mise en forme de la base de données

Un traitement statistique demande selon le type d'analyse, une mise en forme des données. En analyse multivariée, les données sont réparties en deux tableaux ou matrices : une matrice regroupant les variables mésologiques et une matrice regroupant les variables biologiques.

4.1.1. Les matrices du milieu

Concernant les facteurs mésologiques, la première difficulté a été d'identifier et de récupérer des données exploitables pour les analyses (Annexe 7).

À partir des données récoltées dans le cadre des suivis, il a été possible de récupérer les variables suivantes dans un premier temps :

- Les pourcentages de substrats non organiques fins ou grossiers et les pourcentages de substrats organiques issus des pourcentages de recouvrement.
- Les classes IBGN de vitesse v en cm/s : N1 : $v < 5$; N3 : $5 < v < 25$; N5 : $25 < v < 75$; N6 : $v > 75$

Par la suite, d'autres variables pourront venir compléter ce jeu de données (des variables de terrain ou hydrauliques par exemple). Etant donné que la méthode de caractérisation des boires a été mise en place à partir de l'année 2018, les données substrats et vitesses des boires avant 2018 sont inexistantes.

Tableau 7 Extrait de la matrice des données du milieu pour le peuplement macrobenthique de l'année 2018

Code site	Substrat fin	Substrat grossier	Substrat organique	Vitesse
ANJ_1_AD_18	97.5	2.5	21.3	N1
ANJ_1_PR_18	97.5	2.5	21.3	N1
ANJ_2_AD_18	99.8	0.2	4	N1
ANJ_2_PR_18	99.8	0.2	4	N1
BEAU_1_AD_18	100	0	9	N1
BEAU_1_PR_18	100	0	9	N1
BEAU_2_AD_18	97.3	2.7	57.1	N1
BEAU_2_PR_18	97.3	2.7	57.1	N1
DAG_1_AD_18	100	0	62.2	N1
DAG_1_PR_18	100	0	62.2	N1
DRA_1_AD_CAMP2_18	100	0	0	N1
DRA_1_PR_CAMP2_18	100	0	0	N1
DRA_1_AD_CAMP1_18	100	0	47.2	N1
DRA_1_PR_CAMP1_18	100	0	47.2	N1
DRA_2_AD_18	99.2	0.8	3.4	N3
DRA_2_PR_18	99.2	0.8	3.4	N3
TREB_1_AD_18	88.2	11.8	2.9	N1
TREB_1_PR_18	89.2	10.8	2.9	N1
TREB_2_AD_18	87.9	12.1	1	N3
TREB_2_PR_18	87.9	12.1	1	N3
VIN_1_AD_CAMP1_18	96.4	3.6	3.8	N1
VIN_1_PR_CAMP1_18	96.4	3.6	3.8	N1
VIN_1_AD_CAMP2_18	96.1	3.9	2	N1
VIN_1_PR_CAMP2_18	96.1	3.9	2	N1
VIN_2_AD_CAMP1_18	89.6	10.4	1.1	N1
VIN_2_PR_CAMP1_18	89.6	10.4	1.1	N1
VIN_2_AD_CAMP2_18	96	4	1.6	N1
VIN_2_PR_CAMP2_18	96	4	1.6	N1

4.1.2. Les matrices faunistiques

Les données des matrices faunistiques sont issues des pêches électriques et des prélèvements macrobenthiques. Il est important de noter que les relevés piscicoles et macrobenthiques ont été réalisés majoritairement sur les mêmes boires. Cependant, sur certaines boires, les conditions de collecte étant trop difficiles, seule un des deux prélèvements a pu être possible, d'où une différence du nombre de sites entre les matrices poissons et macroinvertébrés (Annexe 8).

La matrice « poisson » se compose donc en colonne par les espèces piscicoles, et en ligne par les effectifs observés par boire. Cependant, après un test de normalité, il se trouve que l'échantillon de données ne suit pas une loi normale. En effet, étant un espace relativement fermé pour les poissons, les boires n'ont pas la possibilité de présenter un peuplement « normal », surtout en cas de prolifération d'une espèce. Les données sont donc pour la suite des analyses, transformées sous la forme $\log(x+1)$.

La matrice « macroinvertébré » se compose de manière similaire à celle des poissons mais cette fois-ci, les effectifs sont donnés par classe d'abondance :

Classe 1 : de 0 à 10 individus

Classe 2 : de 10 à 100 individus

Classe 3 : de 100 à 1000 individus

Ces transformations de données quantitatives (effectifs) en données semi-quantitatives (classes) et la transformation $\log(x+1)$ permettent ainsi de minimiser le risque de sur-représentation de certains taxons.

Tableau 8 Extrait des matrices faunistiques des peuplements piscicoles (en haut) et macrobenthiques (en bas).

	ABL	ANG	BOU	BRB	BRE	BRO	CAA	CAS	CCO
ANJ_01_2018	1.66275783	0.301029996	1.968482949	0	0	0.69897	0	0	0
ANJ_02_2018	0.30103	0.602059991	2.049218023	0	1.17609126	0	0	0	0
DRA_01_2018	0.60205999	0	1.041392685	0	0	0.30103	0	0	0
DRA_02_2018	0	0.602059991	1.77815125	0	0	1	0	0.47712125	0
TREB_01_2018	1.69019608	0.301029996	1.531478917	0	0	0	0	0	0
TREB_02_2018	1.20411998	0.77815125	1.792391689	0.301029996	0	0.30103	0	0	0
DAG_01_2018	0	0	1.875061263	0.301029996	0	0	0	0	0.95424251
PAT_01_2019_AMONT	0	0.301029996	0	0	0	0	0.30103	0	0
PAT_02_2019_AVAL	0.30103	1.342422681	0	0	0	0	0	0	0
CHAM_01_2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0.60205999
CHAM_02_2019	0	1.146128036	1.146128036	0	0	0	0	0	0.47712125
BUT_01_2019	0	0	0	0	0	0.30103	0	0	0.47712125

	Brachycentridae	Brachycentrus	Ecnomidae	Ecnomus	Hydropsychidae	Hydropsyché	Leptoceridae	Athripsodes	Mystacides
ANJ_1_AD_18	0	0	0	0	0	0	1	1	1
ANJ_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANJ_2_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANJ_2_PR_18	0	0	1	1	0	0	0	0	0
BEAU_1_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_2_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_2_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAG_1_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAG_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_AD_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_PR_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_AD_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_PR_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_2_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_2_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TREB_1_AD_18	1	1	0	0	1	1	0	0	0
TREB_1_PR_18	0	0	0	0	1	1	0	0	0
TREB_2_AD_18	1	1	1	1	1	1	0	0	0
TREB_2_PR_18	0	0	0	0	1	1	0	0	0
VIN_1_AD_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIN_1_PR_CAMP1_18	0	0	0	0	1	1	0	0	0
VIN_1_AD_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIN_1_PR_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIN_2_AD_CAMP1_18	1	1	1	1	1	1	0	0	0
VIN_2_PR_CAMP1_18	0	0	1	1	0	0	0	0	0
VIN_2_AD_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	1	0	1
VIN_2_PR_CAMP2_18	0	0	1	1	0	0	1	1	1

Enfin, une attention particulière a été donnée dans l'harmonisation de la base de données, évitant ainsi de représenter des espèces totalement absente sur les boires et la suppression en particulier des cyprinidés indéterminés dans la matrice poisson.

4.2. Essais de traitements statistiques des peuplements des boires

4.2.1. Traitement par NMDS : confirmer les dissimilarités entre les boires

Une analyse de positionnement multidimensionnel est réalisée pour apporter une confirmation des analyses factorielles antérieures, par l'étude des similitudes des peuplements faunistiques des boires

Les références des stations sur les biplots suivants apparaissent selon un modèle mis en place par RIVE :

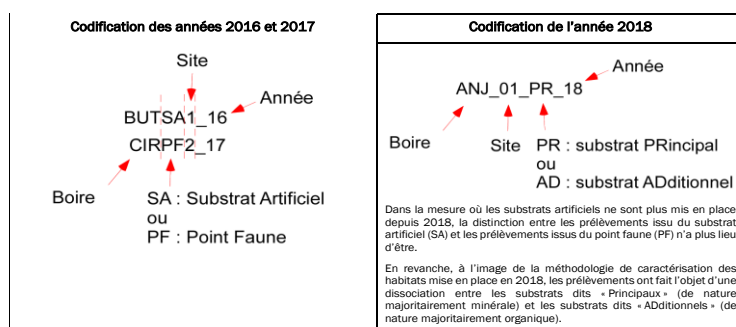


Figure 11 Codification des boires pour le suivi faunistique entre 2016 et 2017 puis après 2018. SA/PF/AD/PR concernent la codification pour les macroinvertébrés.

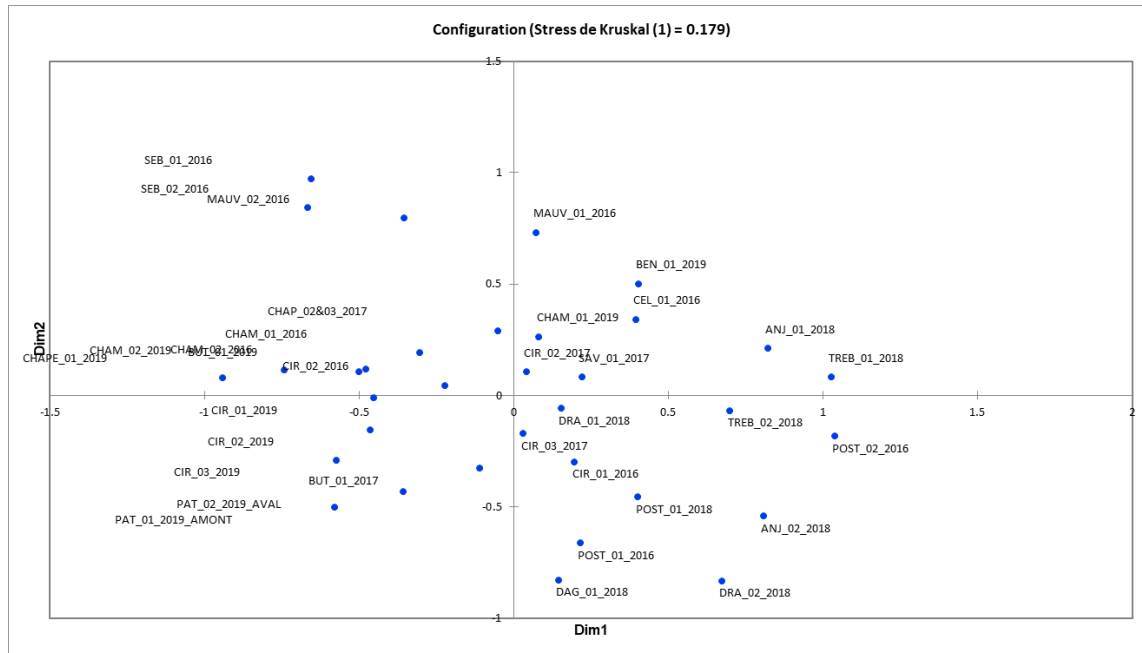


Figure 12 Analyse par NMDS des boires selon les peuplements piscicoles entre 2016 et 2019.

L'analyse NMDS des peuplements piscicoles révèle bien la singularité des boires en 2016 de Saint Sébastien, du Cellier, de la Poste et de Mauves ; en 2018 des boires d'Anjou, de Daguenière et de Drain (les boires les plus éloignées du centre). Cependant, de manière globale, on observe que les peuplements des boires sont très éparpillés et ne forment pas distinctement des groupes de boires similaires.

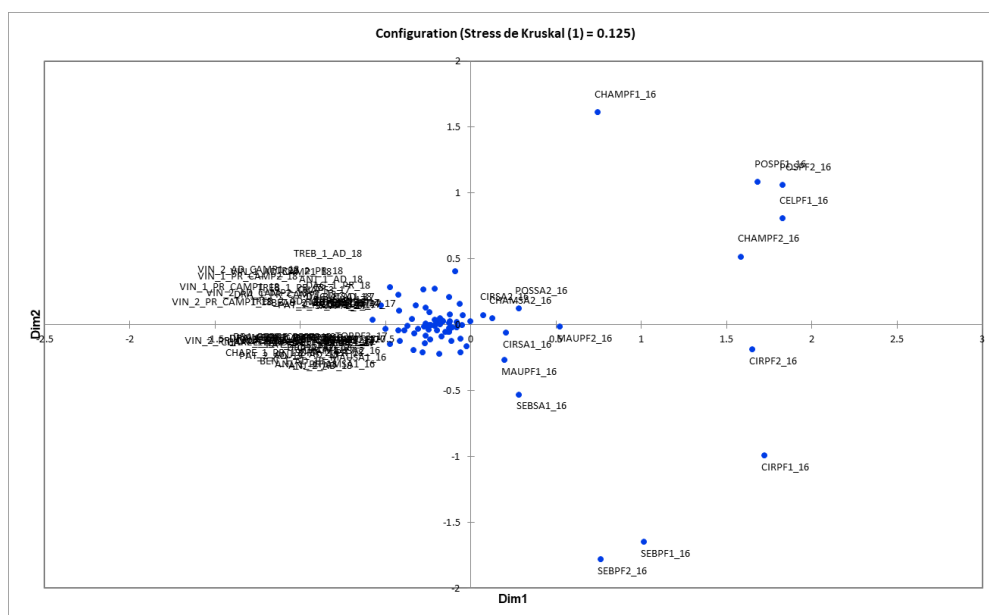


Figure 13 Analyse par NMDS des boires selon les peuplements macrobenthiques entre 2016 et 2019

L'analyse NMDS par les macroinvertébrés montre une certaine similitude pour la plupart des boires (situé au centre des axes) mais surtout une grande dissimilarité des boires étudiées en 2016 (Ile de la Poste, Champtocé, Saint Sébastien, Ciretterie et Cellier entre autre). Cette différence interannuelle du fait des conditions hydrauliques particulières (notamment les années 2016 et 2017) avait déjà été mise en évidence et est de nouveau confirmée par l'analyse NMDS.

4.2.2. Traitement par RDA/ACC : identifier les variables environnementales explicatives

4.2.2.1. RDA ou ACC ?

Dans une démarche similaire à la démarche retrouvée dans la littérature scientifique, le choix le plus adéquat entre une RDA et une ACC se fait par l'application d'une DCA. N'étant pas disponible dans les fonctionnalités de XLSTAT, cette étape est réalisée sous R grâce au package vegan 2.5-6 (Community Ecology Package).

```
Detrended correspondence analysis with 26 segments.
Rescaling of axes with 4 iterations.

DCA1 DCA2 DCA3 DCA4
Eigenvalues 0.3995 0.3244 0.18528 0.14209
Decorana values 0.6250 0.2648 0.09076 0.03544
Axis lengths 3.9471 3.1249 1.63182 1.71723

Detrended correspondence analysis with 26 segments.
Rescaling of axes with 4 iterations.

DCA1 DCA2 DCA3 DCA4
Eigenvalues 0.3688 0.3291 0.2537 0.2323
Decorana values 0.4882 0.3473 0.2684 0.1665
Axis lengths 3.9559 3.0235 3.0194 2.6827
```

Figure 14 Résultats de la DCA réalisée sous R pour les peuplements piscicoles (en haut) et les peuplements macrobenthiques (en bas) en 2018 et 2019.

Une fois l'analyse réalisée sur les données biologiques, on applique la « règle des pouces » ou the « rule of thumb » (Šmilauer et Lepš, 2014), qui utilise la longueur du premier axe DCA (Axis lengths encadré en rouge) pour évaluer si les liens sont unimodaux ou linéaires entre les variables. Cette longueur est mesurée en unité de déviation standard appelée « SD ».

Méthode de sélection de l'analyse :

- Longueur du premier axe > 4SD : la base de données est hétérogène, une ACC est conseillée.
- Longueur du premier axe < 3SD : la base de données est homogène, une RDA est conseillée.
- Longueur du premier axe entre 3 et 4 SD : les deux analyses sont possibles.

Ainsi, il apparaît que les longueurs du premier axe DCA se situent entre 3 et 4 SD pour les peuplements macrobenthiques (3,95) et piscicoles (3,94) mais reste inférieur à 4. Il est donc décidé d'appliquer une RDA.

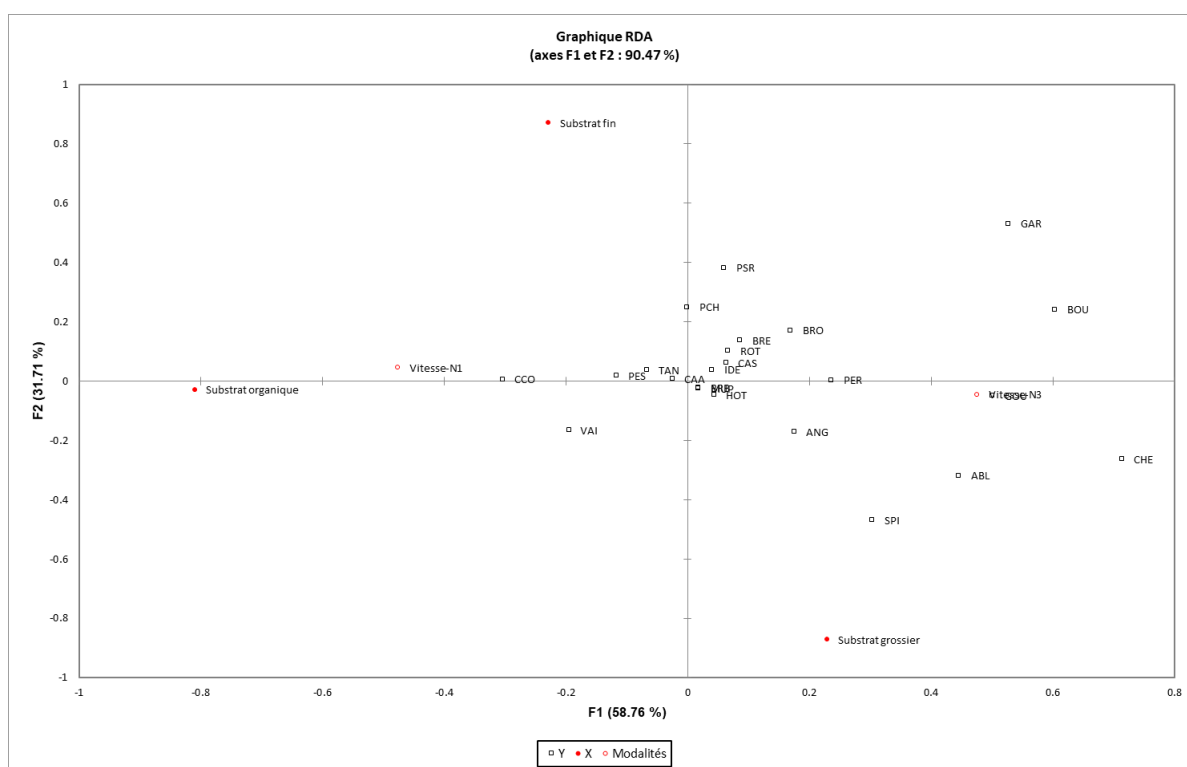
4.2.2.2. Traitements des données de 2018 et 2019

Les premières analyses factorielles du rapport d'expertise (Colas et Bacchi, 2019) ont révélé un fort impact des conditions locales par années. Par conséquent, dans l'optique d'identifier quelles sont les facteurs les plus explicatifs, on se propose de regarder la contribution de certaines variables environnementales pour les années 2018 et 2019, et ainsi d'identifier la ou les variables les plus explicatives de la structure des peuplements.

Nb : les boires de la Patache, du Chapeau et du Bénâcle de 2019 n'ont pas pu être prises en compte dans les analyses étant donné que les données du milieu ne sont pas encore disponibles à l'heure actuelle.

Contrairement aux cours d'eau, les vitesses varient peu au sein des boires. En terme d'habitabilité, on peut donc supposer que la variable la plus explicative de la variation des peuplements est plutôt liée au substrat.

➤ Peuplements piscicoles en 2018 et 2019



Scores (Variables explicatives) :

	F1	F2	F3
Substrat fin	-0.229	0.872	0.025
Substrat gross	0.229	-0.872	-0.025
Substrat organi	-0.809	-0.029	-0.141
Vitesse-N1	-0.476	0.045	0.626
Vitesse-N3	0.476	-0.045	-0.626

Figure 15 Analyse par RDA et scores des coefficients des variables explicatives des peuplements piscicoles de l'année 2018 et 2019.

À première vue, on note l'opposition substrat fin/vitesse N1 et substrat grossier/vitesse N3 sur l'axe F1 horizontal. Ce résultat semble cohérent lorsque l'on observe la distribution des espèces. Ainsi, dans un milieu plutôt lotique avec des substrats de taille importante, on retrouve des chevaines, des spirilins et des ablettes caractéristiques de ce type de milieu. Dans un milieu lentique à substrats fins cependant, on retrouve des espèces comme des pseudorasboras (espèce exotique indésirable), des bouvières, des gardons et des brèmes. Les scores des coefficients de variables explicatives fournis par le test, mettent en évidence l'importance du type de substrat et des vitesses.

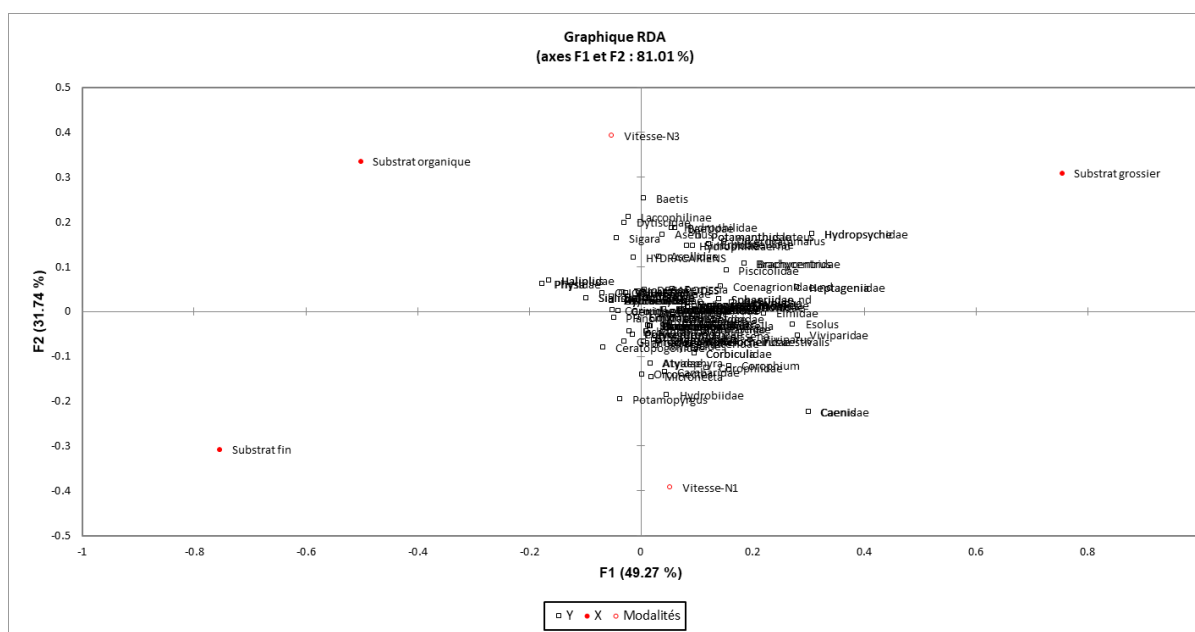
On remarque tout de même que les espèces se démarquant le plus sur le biplot correspondent aux espèces ayant les plus grands effectifs durant l'année 2018 (c'est le cas du gardon d'après le tableau des effectifs). Cela confirme encore l'effet interannuel sur la composition des peuplements.

Dans un deuxième temps, il apparaît que dans le tableau des scores, l'axe F2 vertical semble porter plutôt l'information concernant la taille du substrat, opposant les substrats grossiers aux substrats fins.

Enfin, l'axe F3 (non représentés sur le plot), indiquent cette fois l'importance des vitesses dans la variation des espèces. Mais ayant moins de poids que les deux autres axes, ces variables sont donc bien moins explicatives.

On constate ainsi une contribution importante du facteur « type de substrat », qui expliquerait la variation des peuplements piscicoles sur les boires étudiées en 2018 et 2019.

➤ Peuplements macrobenthiques en 2018 et 2019



Scores (Variables explicatives) :

	F1	F2	F3
Substrat fin	-0.754	-0.308	0.061
Substrat grossier	0.754	0.308	-0.061
Substrat organique	-0.501	0.335	0.523
Vitesse-N1	0.052	-0.392	0.670
Vitesse-N3	-0.052	0.392	-0.670

Figure 16 Analyse par RDA et scores des coefficients de variables explicatives des peuplements macrobenthiques de l'année 2018 et 2019.

On remarque immédiatement d'après le biplot les variables portant le plus d'informations sur les axes. L'axe F1 horizontal est plutôt associé à la taille du substrat (scores des coefficients importants) alors que l'axe F2 vertical est plutôt associé à la combinaison vitesse/substrat. On retrouve donc que les vitesses lentes sont associées aux substrats fins alors que les vitesses rapides sont associées aux substrats organiques et grossiers. Enfin l'axe F3 non visible sur le biplot semble faire référence aux vitesses d'après les scores des coefficients. Ainsi, comme pour les poissons, on remarque une nette opposition entre les espèces inféodées aux milieux à substrats fins avec des vitesses lentes comme les Caenidae ; et celles inféodées aux milieux à substrats grossiers avec des vitesses plus importantes comme les Hydropsychidae.

Ainsi, la taille du substrat semble être prédominant dans l'explication de la composition des peuplements macrobenthiques (cf tableau des scores).

4.3. Intérêt des analyses multivariées dans le cadre des suivis des boires

4.3.1. Influence interannuelle sur les boires

Il semble que dans l'histoire du suivi des boires, l'année 2016 notamment, mais aussi 2018 et 2019 sont des années qui ont montré des variations importantes sur certaines boires.

Ainsi, le fonctionnement particulier des boires en 2016 et 2018 semblent s'expliquer du fait de la densité importante ou de la prédominance de certaines espèces retrouvées sur ces boires. C'est le cas par exemple pour la boire du Cellier qui en 2016 comptabilise 430 gardons ou encore la boire de Saint Sébastien avec 281 épinoches sur le site 1 et 249 épinoches sur le site 2.

Les dissimilarités constatées entre les boires par les peuplements de macroinvertébrés illustrent parfaitement l'influence des conditions annuelles sur ces animaux. Ainsi, les boires de l'année 2016 se dégagent nettement des autres boires, car en effet, c'est la seule année où des espèces macrobenthiques de rang 2 et 3 ont été retrouvées. Les autres années les effectifs de macroinvertébrés sont tous de rang 1. Ajouté à cela, comme le rapport d'expertise (Colas et Bacchi 2019) l'indique, les conditions hydrologiques de crue exceptionnelle cette année là, ont pu jouer un rôle important dans cette distinction.

Tableau 9 Nombre d'espèces macrobenthiques par rang et par année.

Année	rang1	rang2	rang3
2016	331	138	49
2017	313	0	0
2018	556	0	0
2019	164	0	0

Le traitement des données par une analyse NMDS confirme bien la problématique de variation inter-annuelle qui influence grandement les peuplements surtout concernant les peuplements macrobenthiques.

4.3.2. Contribution des variables environnementales sur la structure des peuplements des boires

À l'image des articles scientifiques utilisant une analyse RDA ou ACC, il semblait important d'évaluer la part d'explicative des variables mésologiques prises en compte dans la variation des peuplements aquatiques des boires.

Tableau 10 Valeurs propres et pourcentages d'inertie de l'analyse RDA, pour les peuplements de poissons à gauche, et de macroinvertébrés à droite de l'année 2018 et 2019.

	F1	F2	F3
Valeur propre	1.301	0.702	0.211
Inertie contrainte (%)	58.761	31.711	9.528
% cumulé	58.761	90.472	100.000
Inertie totale	27.354	14.762	4.435
% cumulé (%)	27.354	42.116	46.551

	F1	F2	F3
Valeur propre	1.013	0.653	0.390
Inertie contrainte (%)	49.269	31.743	18.988
% cumulé	49.269	81.012	100.000
Inertie totale	7.405	4.771	2.854
% cumulé (%)	7.405	12.176	15.030

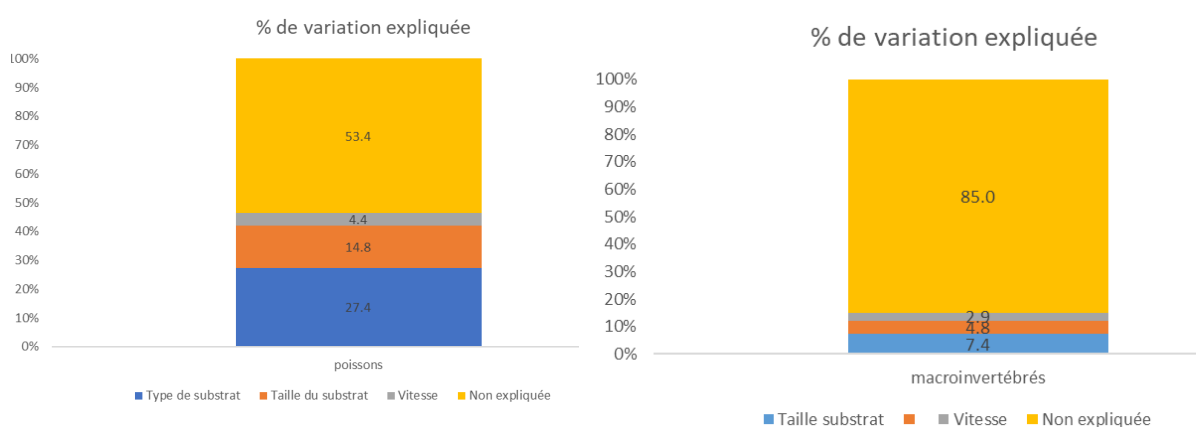


Figure 17 Pourcentage explicatif des variations au sein des peuplements par les variables environnementales étudiées pour l'année 2018 et 2019..

On constate qu'au total les variables environnementales prises en considération pour l'étude n'expliquent pas totalement les variations constatées. Ainsi, chez les peuplements de poissons, les variables mésologiques expliquent 46,6% de la variation alors que chez les macroinvertébrés, seulement 15% des variations sont expliquées. Dans ce dernier cas, il est clair que les variables relatives à l'habitat n'expliquent qu'une mince partie des différences retrouvées au sein des peuplements. Cependant, parmi la part expliquée, le facteur « substrat » semble être le plus prédominant.

4.3.3. Critiques et points d'amélioration des modèles

En 2018 et 2019, on compte 12 points de prélèvement pour les poissons alors qu'on en compte 32 pour les macroinvertébrés. Cette observation pourrait être la cause de différences de fiabilité des tests précédents.

Des tests de permutation sont donc indispensables pour confirmer la fiabilité des RDA :

Permutations	500	Permutations	500
Pseudo F	2.323	Pseudo F	1.651
p-value	0.004	p-value	0.002
alpha	0.050	alpha	0.050

Figure 18 Résultats des tests de fiabilité des analyses RDA pour les peuplements piscicoles à gauche et macroinvertébrés à droite en 2018 et 2019.

Ainsi, les résultats ci-dessus permettent de confirmer que les tests RDA sont bien fiables au regard de la p-value (0,4% et 0,2%).

Par la suite, améliorer les modèles avec plus de données mésologiques pourraient affiner et par conséquent, augmenter la part explicative des variables. Par exemple, en y ajoutant des données relatives à la connection des boires à la Loire (le nombre de jours où la boire est connectée ; le nombre de jours où la boire est inondée ; le niveau de variation d'eau depuis la dernière crue avant le prélèvement etc...), ou bien des données physico-chimiques comme le pH ou la concentration en oxygène.



5. CONCLUSION

Pour permettre le diagnostic du fonctionnement hydroécologique des boires de Loire et l'analyse de l'impact des travaux de restauration entrepris par le CEN, il s'est avéré essentiel d'identifier les éléments du milieu influençant la structure des peuplements aquatiques, qu'ils soient naturels (hydraulique, habitat) ou anthropiques (travaux etc...).

La recherche bibliographique a permis de déterminer différentes techniques d'analyses statistiques utilisables en écologie, notamment les méthodes d'ordination directes et indirectes de gradient. Pour ce qui est d'identifier les variables expliquant la ou les réponses biologiques observées, c'est-à-dire demandant une méthode directe de gradient, la littérature scientifique confirme que l'analyse canonique des correspondances (ACC) et l'analyse de redondance (RDA) sont largement utilisées (relevés 11 fois). En effet, ces méthodes statistiques sont relativement abordables car facilement disponibles sur plusieurs logiciels tels que XLSTAT, CANOCO ou sous R, et sont également bien renseignées dans la littérature. De plus, l'étude bibliographique montre la nécessité d'associer plusieurs méthodes pouvant être envisagées pour confirmer certains tests (Positionnement multidimensionnel non métrique par exemple), pour tester la fiabilité d'une méthode ou bien pour orienter le choix vers d'autres méthodes (Analyse des correspondances détendancées pour choisir entre l'ACC et la RDA).

Sur la base de cette pré-étude, certaines données biologiques et mésologiques des boires de Loire ont été mises en relation. Ces tests (ACC et RDA), ont permis de mettre en évidence sur l'année 2018 et 2019, l'importance du substrat et notamment l'importance du type de substrat pour les poissons et de la taille du substrat pour les macroinvertébrés des boires. Cependant, cette importance n'est pas la même selon la faune étudiée, puisque parmi les facteurs étudiés, le substrat explique 27% des variations des effectifs piscicoles, alors qu'il explique seulement 7% des variations macrobenthiques. Enfin, dans les deux cas, la part « non expliquée » reste largement significative (53,4% et 85,6%), démontrant ainsi, que ce n'est certainement pas le seul élément influençant à prendre en compte (surtout concernant les macroinvertébrés). En ce qui concerne le fonctionnement des boires, il semble que les données habitationnelles ne suffisent pas pour expliquer la structure des peuplements. Mais ce premier travail de recherche et de test, a permis de « dégrossir » les traitements statistiques réalisables entre des données mésologiques et des données biologiques.

Pour la suite, il semble important de collecter des données supplémentaires relatives à la connectivité des boires à la Loire, qui sont des données extrêmement dépendantes des conditions hydrauliques annuelles et du fonctionnement propre à chaque boire. Aussi, l'ajout de données physico-chimiques, hydrauliques ou climatiques sur les années 2018 à 2020, pourrait grandement améliorer la compréhension du fonctionnement des peuplements des boires. Dans un deuxième temps, la mise en relations entre les peuplements et les traits éco-biologiques pourrait venir compléter l'étude, puisque cela permettrait de préciser comment les peuplements se structurent suivant les besoins trophiques, les préférences de vitesse et leur reproduction.

Au final, il s'avère que les premiers éléments de l'analyse montrent que la part explicative prise par certains facteurs mésologiques globaux (climat, régime hydraulique, degré de connexion des annexes) rendent très difficile une réelle caractérisation des travaux dans ces milieux. En effet, disposer d'une référence fiable (boire présentant un fonctionnement mésologique semblable mais sans travaux), permettrait de quantifier les effets des travaux indépendamment des variations écologiques naturelles (crue, étiage, canicule...). Cependant, en l'état, de nos connaissances il semble très difficile de trouver pour chaque boire une référence puisque chacune d'entre elle possède un fonctionnement hydroécologique qui lui est propre.

Aussi, il est probable que la caractérisation directe des travaux ne puisse être réalisée même en utilisant des analyses statistiques très performantes. Il sera nécessaire de s'orienter vers la définition des « gains écologiques potentiels » qui devraient être analysés non pas sur une seule et même boire, mais sur un ensemble de boires circonscrit dans un espace géographique cohérent, notamment du point de vue des facteurs mésologiques les plus impactants.

BIBLIOGRAPHIE

Bateman H. L., Riddle S. B. Reptile community responses to native and non-native riparian forests and disturbance along two rivers in Arizona. *River Res. Appl.* [En ligne]. mars 2020. Vol. 36, n°3, p. 492-502. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/rra.3587> >

Ter Braak C. J. F. Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis. *Ecology* [En ligne]. octobre 1986. Vol. 67, n°5, p. 1167-1179. Disponible sur : < <https://doi.org/10.2307/1938672> >

Cai Y., Gong Z., Qin B. Influences of habitat type and environmental variables on benthic macroinvertebrate communities in a large shallow subtropical lake (Lake Taihu, China). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* [En ligne]. ed 2011. Vol. 47, n°1, p. 85-95. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1051/limn/2010028> >

Castéra J., Munoz F., Clement P. Les conceptions d'enseignants du primaire et du secondaire sur le déterminisme biologique de la personnalité humaine dans 12 pays d'Europe, d'Afrique et du Moyen Orient. 2007. p. 13.

Colas F., Bacchi M. *Contrat pour la Loire et ses Annexes (2016-2018) - Etude de la faune macrobenthique et piscicole dans des annexes de Loire.* [s.l.] : Conservatoire d'espaces naturelles des Pays de la Loire, 2019.

D'Ambrosio J. L., Williams L. R., Witter J. D., Ward A. Effects of geomorphology, habitat, and spatial location on fish assemblages in a watershed in Ohio, USA. *Environ Monit Assess* [En ligne]. 1 janvier 2009. Vol. 148, n°1, p. 325-341. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0163-3> >

Díaz-García J. M., López-Barrera F., Toledo-Aceves T., Andresen E., Pineda E. Does forest restoration assist the recovery of threatened species? A study of cloud forest amphibian communities. *Biological Conservation* [En ligne]. février 2020. Vol. 242, p. 108400. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108400> >

Dolédec S., Chessel D. Between- and within-groups principal components analyses_ADE-4 / Fiche thématique 2.6. 1998.

Esselman P. C., Allan J. D. Relative influences of catchment- and reach-scale abiotic factors on freshwater fish communities in rivers of northeastern Mesoamerica. *Ecology of Freshwater Fish* [En ligne]. 2010. Vol. 19, n°3, p. 439-454. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2010.00430.x> >

Fonnesu A., Sabetta L., Basset A. Factors Affecting Macroinvertebrate Distribution in a Mediterranean Intermittent Stream. *Journal of Freshwater Ecology* [En ligne]. décembre 2005. Vol. 20, n°4, p. 641-647. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/02705060.2005.9664786> >

Gangloff M. M., Feminella J. W. Stream channel geomorphology influences mussel abundance in southern Appalachian streams, U.S.A. *Freshwater Biology* [En ligne]. 2007. Vol. 52, n°1, p. 64-74. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01673.x> >

García-Roger E. M., Sánchez-Montoya M. del M., Cid N., Erba S., Karaouzas I., Verkaik I., Rieradevall M., Gómez R., Suárez M. L., Vidal-Abarca M. R., Demartini D., Buffagni A., Skoulikidis N., Bonada N., Prat N. Spatial scale effects on taxonomic and biological trait diversity of aquatic macroinvertebrates in Mediterranean streams. *Fund. App. Lim.* [En ligne]. 1 septembre 2013. Vol. 183, n°2, p. 89-105. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2013/0429> >

Haase P., Hering D., Jähnig S. C., Lorenz A. W., Sundermann A. The impact of hydromorphological restoration on river ecological status: a comparison of fish, benthic invertebrates, and macrophytes. *Hydrobiologia* [En ligne]. 1 mars 2013. Vol. 704, n°1, p. 475-488. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1255-1> >

Hamilton S. G., King S. L., Dello Russo G., Kaller M. D. Effect of Hydrologic, Geomorphic, and Vegetative Conditions on Avian Communities in The Middle Rio Grande of New Mexico. *Wetlands* [En ligne]. octobre 2019. Vol. 39, n°5, p. 1029-1042. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01156-9> >

Hay C. H., Franti T. G., Marx D. B., Peters E. J., Hesse L. W. Macroinvertebrate drift density in relation to abiotic factors in the Missouri River. *Hydrobiologia* [En ligne]. 1 février 2008. Vol. 598, n°1, p. 175-189. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9149-3> >

Hérault B., Rossi V. *méthodes d'ordination pour l'analyse des données écologiques*. 2013.

Höckendorff S., Tonkin J. D., Haase P., Bunzel-Drüke M., Zimball O., Scharf M., Stoll S. Characterizing fish responses to a river restoration over 21 years based on species' traits. *Conservation Biology* [En ligne]. octobre 2017. Vol. 31, n°5, p. 1098. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/cobi.12908> >

Inoue K., Stoeckl K., Geist J. Joint species models reveal the effects of environment on community assemblage of freshwater mussels and fishes in European rivers. *Diversity and Distributions*. 2017. Vol. 23, n°3/4, p. 284-296.

Kalogianni E., Vourka A., Karaouzas I., Vardakas L., Laschou S., Skoulidakis N. Th. Combined effects of water stress and pollution on macroinvertebrate and fish assemblages in a Mediterranean intermittent river. *Science of The Total Environment* [En ligne]. décembre 2017. Vol. 603-604, p. 639-650. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.078> >

Karaouzas I., Theodoropoulos C., Vourka A., Gritsalis K., Skoulidakis N. Th. Stream invertebrate communities are primarily shaped by hydrological factors and ultimately fine-tuned by local habitat conditions. *Science of the Total Environment* [En ligne]. 15 mai 2019. Vol. 665, p. 290-299. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.134> >

Lechêne A., Boët P., Laffaille P., Lobry J. Nekton communities of tidally restored marshes: A whole-estuary approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* [En ligne]. juillet 2018. Vol. 207, p. 368-382. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.08.038> >

Legendre P. *Ordination en espace réduit _ 1.0 Introduction* [En ligne]. 2019. Disponible sur : < http://biol09.biol.umontreal.ca/CoursPL/Ordination_section_1.0_Fr.pdf >

Marzin A., Verdonschot P. F. M., Pont D. The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers. *Hydrobiologia* [En ligne]. 1 mars 2013. Vol. 704, n°1, p. 375-388. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1254-2> >

Mereta S. T., Boets P., Ambelu Bayih A., Malu A., Ephrem Z., Sisay A., Endale H., Yitbarek M., Jemal A., De Meester L., Goethals P. L. M. Analysis of environmental factors determining the abundance and diversity of macroinvertebrate taxa in natural wetlands of Southwest Ethiopia. *Ecological Informatics* [En ligne]. 1 janvier 2012. Vol. 7, n°1, p. 52-61. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.11.005> >

Powell B. F., Steidl R. J. Influence of Vegetation on Montane Riparian Bird Communities in the Sky Islands of Arizona, Usa. *Southw. Natural.* [En ligne]. mars 2015. Vol. 60, n°1, p. 65-71. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1894/MCG-09.1> >

Rae J. Abiotic factors affect microhabitat selection and community dynamics in a sandy-bottom lotic chironomid midge assemblage. *Hydrobiologia* [En ligne]. janvier 2013. Vol. 700, n°1, p. 121. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1223-9> >

Shirey P. D., Brueseke M. A., Kenny J. B., Lamberti G. A. Long-term fish community response to a reach-scale stream restoration. *E&S* [En ligne]. 2016. Vol. 21, n°3, p. art11. Disponible sur : < <https://doi.org/10.5751/ES-08584-210311> >

Šmilauer P., Lepš J. *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO 5* [En ligne]. 2^e éd. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1017/CBO9781139627061> > (consulté le 16 juin 2020) ISBN : 978-1-107-69440-8.

Sundermann A., Gerhardt M., Kappes H., Haase P. Stressor prioritisation in riverine ecosystems: Which environmental factors shape benthic invertebrate assemblage metrics?. *Ecological Indicators* [En ligne]. 1 avril 2013. Vol. 27, p. 83-96. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.003> >

Theodoropoulos C., Vourka A., Stamou A., Rutschmann P., Skoulikidis N. Response of freshwater macroinvertebrates to rainfall-induced high flows: A hydroecological approach. *Ecological Indicators* [En ligne]. 1 février 2017. Vol. 73, p. 432-442. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.011> >

Vanausdall R. A., Dinsmore S. J. Impacts of Shallow Lake Restoration on Vegetation and Breeding Birds in Iowa. *Wetlands* [En ligne]. août 2019. Vol. 39, n°4, p. 865-877. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1120-8> >

Wang L., Lyons J., Rasmussen P., Seelbach P., Simon T., Wiley M., Kanehl P., Baker E., Niemela S., Stewart P. M. Watershed, reach, and riparian influences on stream fish assemblages in the Northern Lakes and Forest Ecoregion, U.S.A. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* [En ligne]. 1 mai 2003. Vol. 60, n°5, p. 491-505. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1139/f03-043> >

Zylstra E. R., Steidl R. J., Swann D. E., Ratzlaff K. Hydrologic Variability Governs Population Dynamics of a Vulnerable Amphibian in an Arid Environment. *PLoS One* [En ligne]. 1 juin 2015. Vol. 10, n°6, p. e0125670. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125670> >

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE DU STAGE.....	3
2.1. Présentation de la structure d'accueil	4
2.1.1. La société RIVE	4
2.1.2. L'équipe.....	4
2.1.3. Les compétences de RIVE.....	4
2.2. Présentation de l'étude.....	5
2.2.1. Objectif de l'étude et premiers résultats	5
2.2.2. Problématisation du sujet de recherche	7
3. LES METHODES D'ANALYSE DANS UN CONTEXTE MULTIVARIABLE	8
3.1. Étapes de recherche dans la littérature scientifique.....	9
3.1.1. Sélection des articles.....	9
3.1.2. Classement des articles	9
3.2. Les méthodes statistiques identifiées	9
3.3. Synthèse sur les méthodes d'analyses	11
3.3.1. L'Analyse Canonique des Correspondances (ACC) et l'analyse de redondance (RDA)	11
3.3.1.1. Fiche descriptive de l'ACC	11
3.3.1.2. Fiche descriptive de la RDA	12
3.3.1.3. Exemples d'application de la méthode	13
3.3.1.4. Application possible de la méthode pour les données des boires ?	16
3.3.2. Le positionnement multidimensionnel non métrique (NMDS) et l'analyse en coordonnées principales (PCoA)	16
3.3.2.1. Fiche descriptive des méthodes.....	16
3.3.2.2. Exemples d'application de la méthode	17
3.3.2.3. Application possible de la méthode pour les données des boires ?	19
3.4. Conclusion sur les méthodes applicables pour les données des boires	20
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DES BOIRES :RESULTATS ET DISCUSSION	21
4.1. Mise en forme de la base de données	22
4.1.1. Les matrices du milieu.....	22
4.1.2. Les matrices faunistiques	22
4.2. Essais de traitements statistiques des peuplements des boires	24
4.2.1. Traitement par NMDS : confirmer les dissimilarités entre les boires	24
4.2.2. Traitement par RDA/ACC : identifier les variables environnementales explicatives	25
4.2.2.1. RDA ou ACC ?	25
4.2.2.2. Traitements des données de 2018 et 2019.....	26
4.3. Intérêt des analyses mutlivariées dans le cadre des suivis des boires	28
4.3.1. Influence interannuelle sur les boires	28
4.3.2. Contribution des variables environnementales sur la structure des peuplements des boires	29
4.3.3. Critiques et points d'amélioration des modèles	30
5. CONCLUSION.....	31

TABLES DES FIGURES

Figure 1 Récapitulatif des différentes compétences chez RIVE.	4
Figure 1 Localisation des différentes boires de Loire étudiées en 2016, 2017, 2018 et 2019 (Colas et Bacchi, 2019)	5
Figure 3 Présentation des types de modèles statistiques multivariées de Šmilauer et Lepš (2014). Les méthodes indirectes de gradient apparaissent dans le cadre jaune alors que les méthodes directes de gradient apparaissent dans le cadre rouge.	10
Figure 4 Résultats de l'ACC représentant les espèces, les sites et les variables sur un même graphique.	13
Figure 5 Résultats de la RDA sous forme de triplot incluant les espèces et les variables.	14
Figure 6 Représentations différentes des pourcentages de variation expliqués issues de Esselman et Allan (2010), D'Ambrosio et al. (2009) et Wang et al. (2003)	15
Figure 7 Modèle CART d'arbre de prédiction d'occurrence issu de Mereta et al (2012)	16
Figure 8 Résultats du MDS en 2D et en 3D (XLSTAT-3D plot) issus de XLSTAT.	18
Figure 9 Evaluation de la qualité des résultats en 2D du MDS.	18
Figure 10 Résultats de l'analyse NMDS issus de Cai, Gong, et Qin (2011) montrant 3 habitats avec des communautés bien distinctes.	19
Figure 11 Codification des boires pour le suivi faunistique entre 2016 et 2017 puis après 2018. SA/PF/AD/PR concernant la codification pour les macrinvertébrés.	24
Figure 12 Analyse par NMDS des boires selon les peuplements piscicoles entre 2016 et 2019.	24
Figure 13 Analyse par NMDS des boires selon les peuplements macrobenthiques entre 2016 et 2019	25
Figure 14 Résultats de la DCA réalisée sous R pour les peuplements piscicoles (en haut) et les peuplements macrobenthiques (en bas) en 2018 et 2019.	25
Figure 15 Analyse par RDA et scores des coefficients des variables explicatives des peuplements piscicoles de l'année 2018 et 2019.	27
Figure 16 Analyse par RDA et scores des coefficients de variables explicatives des peuplements macrobenthiques de l'année 2018 et 2019.	28
Figure 17 Pourcentage explicatif des variations au sein des peuplements par les variables environnementales étudiées pour l'année 2018 et 2019.	29
Figure 18 Résultats des tests de fiabilité des analyses RDA pour les peuplements piscicoles à gauche et macroinvertébrés à droite en 2018 et 2019.	30
Figure 19 Fiche terrain de la boire des Savonnières de la méthode CARHAB réalisée en juillet 2020.	39
Figure 20 Représentation schématique de la boire des Savonnières selon la méthode CARHAB réalisée en juillet 2020 sur papier millimétré	39
Figure 21 Fiche résultat de la méthode CARHAB pour la boire des Savonnières.	40
Figure 22 Fiche analyse de la méthode CARHAB pour la boire des Savonnières.	40
Figure 23 Principe de la pêche à l'électricité.	41
Figure 24 Prélèvement de la faune macrobenthique à l'aide d'un surber.	42
Figure 25 Principe du traitement en laboratoire des prélèvements IBG.	42
Figure 26 Résultats de l'AFC sous la forme de graphique symétrique.	50
Figure 27 Premières valeurs propres (λ_1) des analyses ACP et inter-intraclasse issues de la fiche thématique 2.6 par Dolédec et Chessel (1998).	51
Figure 28 Résultats de l'ACP.	52
Figure 29 Résultats de l'analyse interclasse	52
Figure 30 Résultats de l'analyse intraclasse	53
Figure 31 Représentations graphiques des variables (1) et des observations (2) sur un diagramme à deux dimensions.	55
Figure 32 Résultat de l'ACP issu de Haase et al. (2013) illustrant la significative séparation de l'hydromorphologie des sites restaurés (ronds gris et de ceux non restaurés (triangles noirs).	56
Figure 33 Représentation des résidus en fonction du poids et histogramme des résidus centrés réduits de la régression linéaire multiple issu de XLSTAT.	59

TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1 Démarche de recherche des articles dans la littérature scientifique.	9
Tableau 2 Méthodes d'analyse identifiées dans la littérature scientifique.	9
Tableau 3 Jeu de données ACC du tutoriel XLSTAT.	13
Tableau 4 Extrait du jeu de données RDA du tutoriel XLSTAT.	14
Tableau 5 Jeu de données MDS issu du tutoriel XLSTAT.	17
Tableau 6 Récapitulatif des méthodes d'analyses pour les données de l'étude des boires.	20
Tableau 7 Extrait de la matrice des données du milieu pour le peuplement macrobenthique de l'année 2018.	22
Tableau 8 Extrait des matrices faunistiques des peuplements piscicoles (en haut) et macrobenthiques (en bas).	23
Tableau 9 Nombre d'espèces macrobenthiques par rang et par année.	29
Tableau 10 Valeurs propres et pourcentages d'inertie de l'analyse RDA, pour les peuplements de poissons à gauche, et de macroinvertébrés à droite de l'année 2018 et 2019.	29
Tableau 11 Base de données des articles répertoriés et stockés sous PhpMyadmin	43
Tableau 12 Extrait de la grille d'aide XLSTAT pour choisir une méthode d'analyse statistique multivariée.	48
Tableau 13 Jeu de données de l'AFC du tutoriel XLSTAT.	49
Tableau 14 Jeu de données de l'étude de François Munoz et Pierre Clément.	51
Tableau 15 Extrait du jeu de données ACP du tutoriel XLSTAT	54
Tableau 16 Extrait du jeu de données régression linéaire multiple issu de XLSTAT	58
Tableau 17 Résultats de la régression linéaire multiple (R^2 , test F et valeurs à 95% d'intervalle) issu de XLSTAT.	58
Tableau 18 Extrait du jeu de données régression log linéaire du tutoriel XLSTAT.	59
Tableau 19 Résultats de la régression log linéaire sous forme de tableau sous XLSTAT.	60
Tableau 20 Matrice des données habitationnelles pour les boires avec un suivi piscicole en 2018 et 2019.	62
Tableau 21 Matrice des données habitationnelles pour les boires avec un suivi macrobenthique en 2018 et 2019.	62
Tableau 22 Effectifs des espèces piscicoles sur les boires entre 2016 et 2019.	63
Tableau 23 Effectifs log transformés des espèces piscicoles entre 2018 et 2019.	63
Tableau 24 Classes d'effectifs des macroinvertébrés sur les boires entre 2016 et 2019.	64

ANNEXES

Annexe 1 Méthode de caractérisation des Habitats ou méthode CARHAB - RIVE

Sur les sites, on caractérise à l'aide de fiches terrain sur lesquelles sont inscrites les pourcentages de recouvrement de substrats, les pourcentages des classes de vitesses et des hauteurs d'eau. Un schéma du site est réalisé sur papier millimétré et/ou sur orthophotographie sur lesquels sont reportés la forme de la boire ainsi que les différents secteurs à chaque changement évident de substrat, de hauteur d'eau, de vitesse, d'aspect etc... Les largeurs et longueurs des boires sont évaluées à l'aide d'un télémètre laser et les hauteurs d'eau sont estimées à l'aide d'une mire. Enfin, les vitesses sont estimées visuellement par l'opérateur.

CARACTERISATION DES HABITATS										Savonniers 1										Ref. Station		SAV.01									
Renseignements généraux																															
Cours d'eau :										Coordonnées (Lambert 93) :										Amont		Prélèvements									
Réf. station :																				Y :		Opérateur(s) :									
Commune/Dépt. :																				X :		Date : 16/07/2020									
Lieu-dit :																				Aval		Heure :									
N°	FACIES	RECOUVREMENT (%)										VITESSE (cm/s)					HAUTEUR D'EAU (cm)					ECLAIREMENT (0 à 5)									
		Substrats principaux					Substrats additionnels					V-5	5-V-25	25-V-75	V-75	H-10	10-H-50	50-H-100	100-H-200	H-200											
1		R/D	B	P/G	Gr	S	M/A	Va	SPE	SPI	SPIF	Ra	Br	Lit	Al																
2						20	20		10	20																					
3						40	80		10	20																					
4						40	80		60	50																					
5						25	45	80	20	100																					
6							50	20	60	20																					
7							20	20	30	50																					
8																															
9																															
10																															
11																															
12																															
13																															
14																															
15																															

Figure 19 Fiche terrain de la boire des Savonniers de la méthode CARHAB réalisée en juillet 2020.

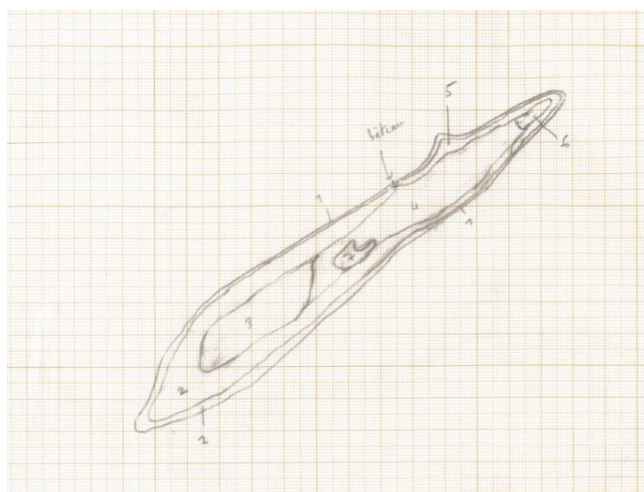


Figure 20 Représentation schématique de la boire des Savonniers selon la méthode CARHAB réalisée en juillet 2020 sur papier millimétré.

Les résultats de la caractérisation se présentent sous forme de 2 fiches : Une première fiche avec les informations de la boire et les résultats bruts par secteur, localisés sur une version vectorisée de la représentation schématique de terrain. Une deuxième fiche regroupant cette fois l'analyse des résultats bruts en y associant les substrats aux classes de vitesse et les hauteurs d'eau.

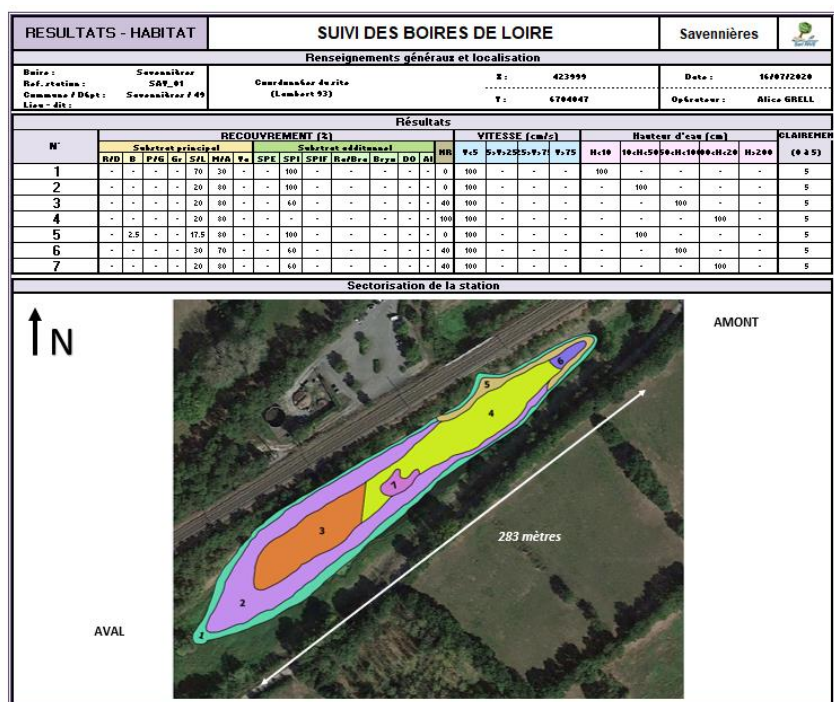


Figure 21 Fiche résultat de la méthode CARHAB pour la boire des Savonnières.

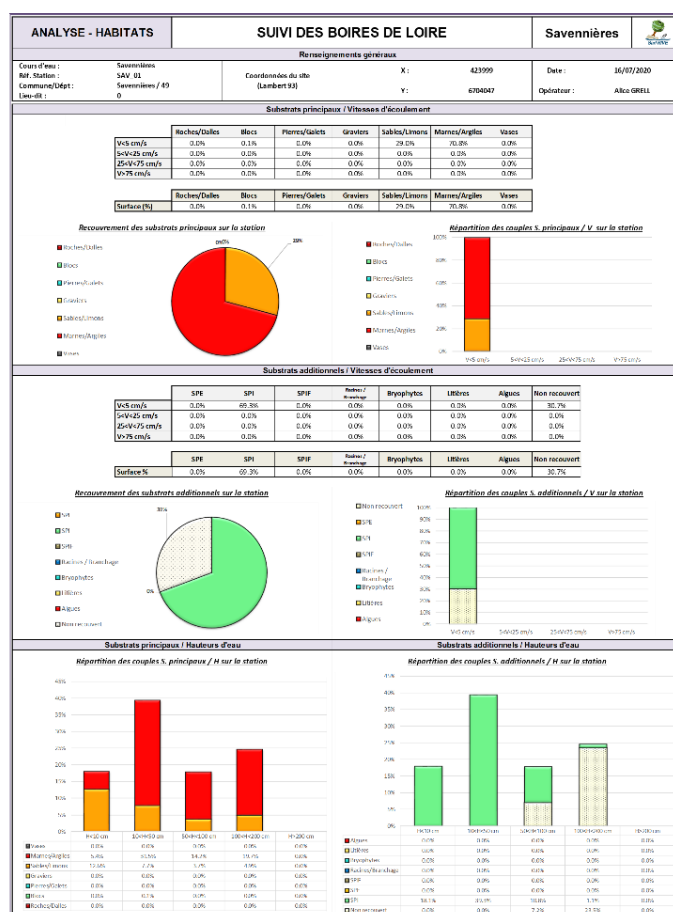


Figure 22 Fiche analyse de la méthode CARHAB pour la boire des Savonnières.

Annexe 2 Méthode de pêche électrique

➤ La prospection

Le principe de la pêche électrique consiste à recueillir les poissons à l'épuisette, qui sont attirés par une électrode positivement chargée plongée dans l'eau. C'est ce qu'on appelle le comportement de « nage forcée » ou galvanotaxie vers l'anode lorsque l'on crée un champ électrique.

Pour procéder à l'échantillonnage, les opérateurs emploient la méthode par « Echantillons Ponctuels d'Abondance » (EPA). Ainsi, 30 points de pêche sont répartis sur le site de prospection que l'on appellera des unités d'échantillonnage. Sur ces unités, l'anode est déplacée sur un rayon de 1 mètre de diamètre correspondant à une surface de 12,5m² pendant 30 secondes.

Les points de prospection sont évidemment répartis sur le site dans le but d'obtenir une bonne représentativité des habitats existants. Avant la pêche, les données physico-chimiques (conductivité, température, pH et concentration en oxygène) du site sont collectées, de plus chaque unité d'échantillonnage fait l'objet d'une description en terme de faciès et de position par rapport à la berge.

Par mesure de sécurité, tous les opérateurs en prospection (à l'anode, au filet et à la bassine) contenant les poissons pêchés) sont équipés de waders, de gants en caoutchouc ainsi que de lunettes polarisantes.

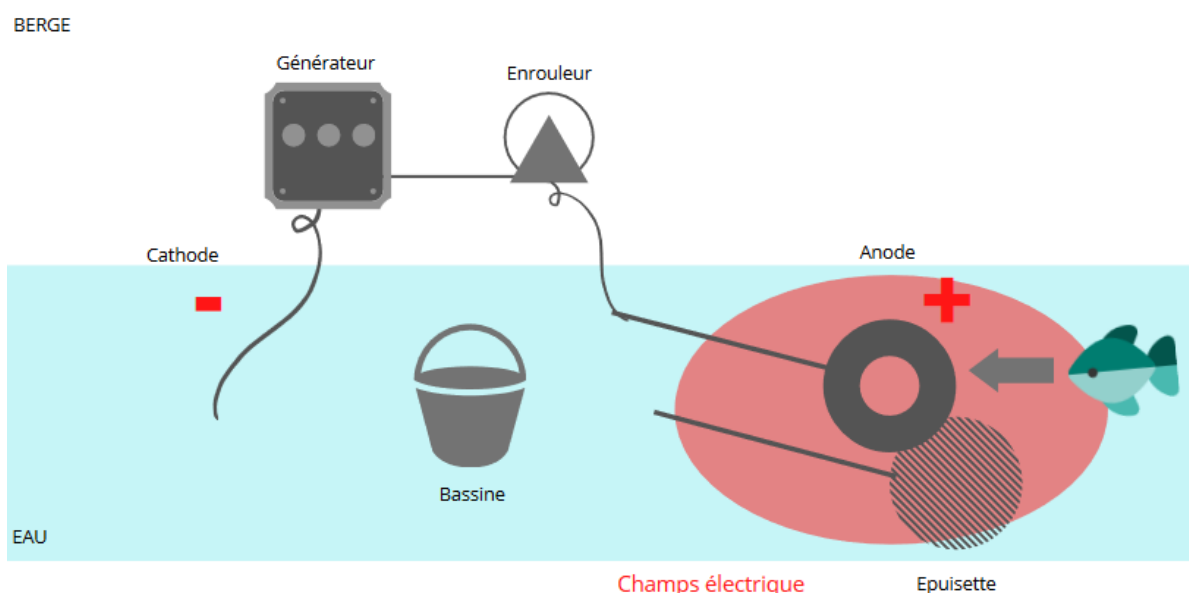


Figure 23 Principe de la pêche à l'électricité.

➤ La biométrie

Le poste de biométrie qui permet l'identification (à l'espèce), l'état sanitaire, la pesée, la mesure et le dénombrement de chaque espèce est installé en berge. Les données sont saisies sur une fiche terrain ou directement sur une tablette de terrain.

Une fois ces opérations terminées, les individus hors espèces exotiques envahissantes, sont remis à l'eau.

Annexe 3 Prélèvement de la faune macrobenthique au surber

➤ La collecte

L'échantillonnage se réalise de l'aval vers l'amont de la boire et selon un protocole développé par RIVE appelé « points faunes ». Le but est de collecter les macroinvertébrés sur l'ensemble des habitats du site selon un couple substrat/vitesse. L'habitabilité des supports est relevé sur des fiches provenant du protocole IBG-DCE (NF T 90-333 septembre 2016).



Figure 24 Prélèvement de la faune macrobenthique à l'aide d'un surber

Une fois collectés par le surber (mailles à 500µm), les échantillons sont conservés dans des sacs plastiques auxquels on ajoute du Fixall-his dilué à 30% pour fixer les macroinvertébrés.

➤ Le traitement en laboratoire

L'étape de tri, comptage et détermination des macroinvertébrés se réalise suivant la norme XP T 90 388 de juin 2010 en laboratoire.

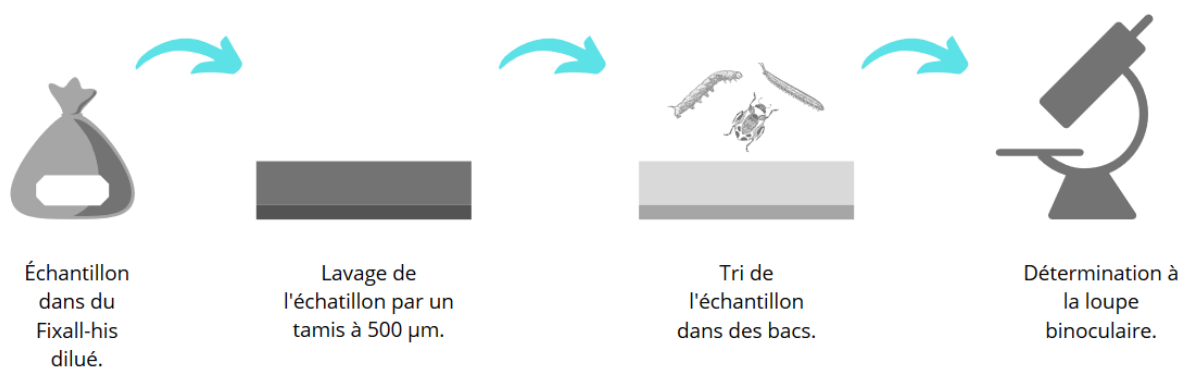


Figure 25 Principe du traitement en laboratoire des prélèvements IBG.

Annexe 4 Base de données des articles scientifiques répertoriés

Tableau 11 Base de données des articles répertoriés et stockés sous PhPmyadmin

id	Titre	Auteurs	Annee	Publication	DOI	Peuplements	Facteurs_mesologiques	Analyses_statistiques	Mots_cles
1	Factors Affecting Macroinvertebrate Distribution in a Mediterranean Intermittent Stream	Fonnesu, Sabetta, Basset	2005	Journal of Freshwater Ecology	10.1080/02705060.2005.9664786	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Morphologique, Habitationnel, Climatique	CCA	Facteurs environnementaux, Région méditerranéenne, Macroinvertébrés, Distribution, Régime hydrologique, Sédiment, Sécheresse.
2	Macroinvertebrate drift density in relation to abiotic factors in the Missouri River	Hay, Franti, Marx et al	2008	Hydrobiologia	10.1007/s10750-007-9149-3	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Hydraulique, Climatique	GLMMs, multimodel inference technique	Macroinvertébrés, Densité, Débit, Température, Turbidité, Grand cours d'eau.
3	Macroinvertebrates in streams: A review of some ecological factors	Qazi A. Hussain	2012	International Journal of Fisheries and Aquaculture	10.5897/IJFA11.045	macroinvertébrés aquatiques	Hydraulique, Physico-chimique, Morphologique, Occupation du sol, Habitationnel, Climatique	ND	Macroinvertébrés, Distribution, Occurrence, Facteurs environnementaux, Courant, Température, Substrat, Occupation du sol, Végétation, pH, Sécheresse, Inondation, Nourriture, Ombrage, Géomorphologie.
4	Analysis of environmental factors determining the abundance and diversity of macroinvertebrate taxa in natural wetlands of Southwest Ethiopia	Mereta, Boets, Ambelu Bayih et al	2012	Ecological Informatics	10.1016/j.ecoinf.2011.11.005	macroinvertébrés aquatiques	Habitationnel, physico-chimique, Morphologique, Occupation du sol	CCA, CART, DCA	Biologie de la conservation, Arbre de décision, Macroinvertébrés, Sensibilité d'analyse, Zones humides.
5	Abiotic factors affect microhabitat selection and community dynamics in a sandy-bottom lotic chironomid midge assemblage	Rae	2013	Hydrobiologia	10.1007/s10750-012-1223-9	macroinvertébrés aquatiques	Habitationnel	DCA, pCCA	Chironomidae, Structure des communautés, pCCA, Courant, Facteurs environnementaux, Microhabitat lotique, Structure, Analyse multivariée, Sédiments.
6	Relative influences of catchment- and reach-scale abiotic factors on freshwater fish communities in rivers of northeastern Mesoamerica.	Esselman, Allan	2010	Ecology of Freshwater Fish	10.1111/j.1600-0633.2010.00430.x	poissons	Climatique, Occupation du sol, Morphologique, Habitationnel	CCA, DCA	Habitat, Échelle, Facteurs abiotiques, Cichlidae, Belize.
7	Influences of habitat type and environmental variables on benthic macroinvertebrate communities in a large shallow subtropical lake (Lake Taihu, China)	Cai, Gong, Qin	2011	Annales de Limnologie - International Journal of Limnology	10.1051/limn/2010028	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Habitationnel	ANOSIM, NMDS, CCA, DCA	Lac, Tubificidae, Mollusque, Gastropode, pollution, Perturbations par le vent, Canonical correspondence analysis (CCA).
8	Stream invertebrate communities are primarily shaped by hydrological factors and ultimately	Karaouzas, Theodoro	2019	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Habitationnel, Hydraulique	CCA, GLMM, BRT, DCA	Richesse spécifique, Diversité, Caractéristiques des espèces, Échelle spatiale, Facteur

	fine-tuned by local habitat conditions	poulos, Vourka et al			2019.02.134				temporel, Hydrologie, Intermittent, Permanent.
9	Spatial scale effects on taxonomic and biological trait diversity of aquatic macroinvertebrates in Mediterranean streams	García-Roger, Sánchez-Montoya, Cid et al	2013	Fundamental and Applied Limnology / Archiv für Hydrobiologie	10.1127/1863-9135/2013/0429	macroinvertébrés aquatiques	Climatique, Physico-chimique, Habitationnel	PCA, GLMs, the fourth corner method	Macroinvertébrés aquatiques, Caractéristiques biologiques, Diversité, Région méditerranéenne, Microhabitats, Saisonnalité, Echelle spatiale.
10	Combined effects of water stress and pollution on macroinvertebrate and fish assemblages in a Mediterranean intermittent river	Kalogianni, Vourka, Karaouzas	2017	Science of The Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2017.06.078	macroinvertébrés aquatiques, poissons	Physico-chimique, Habitationnel, Hydraulique	NMDS, RDA, DCA	Stress, Biote, Habitat aquatique, Sécheresse, Qualité de l'eau, Intermittent, Région méditerranéenne.
11	Response of freshwater macroinvertebrates to rainfall-induced high flows: A hydroecological approach	Theodoro poulos, Vourka, Stamou et al	2017	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2016.10.011	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Habitationnel	BRT, NMDS	Macroinvertébrés, Habitat favorable, Conditions hydrauliques, Microhabitat, Altération des écoulements, Boosted regression.
12	Joint species models reveal the effects of environment on community assemblage of freshwater mussels and fishes in European rivers	Inoue, Stoeckl, Geist	2017	Diversity and Distributions	10.1111/di.12520	macroinvertébrés aquatiques, poissons	Physico-chimique, Climatique, Occupation du sol, Morphologique	GLMs, JSDM	Structure et distribution des communautés aquatiques, Conservation basée sur les communautés, Distribution de moules en danger, Modèle de distribution d'espèces liées, Modèle variable latent.
13	Relationship between species richness and morphodynamics in sandy beaches : what are the underlying factors?	Brazeiro	2001	Marine Ecology Progress Series	10.3354/meps224035	macroinvertébrés aquatiques	Morphologique, Habitationnel Hydraulique, Physico-chimique	Spearman's coefficient	Plage sableuse, Richesse spécifique, Macrofaune, Morphodynamique, "Swash climate", Erosion, Relation animal-sédiment.
14	Importance of Natural and Anthropogenic Environmental Factors to Fish Communities of the Fox River in Illinois	Schnier, Cai, Cao	2016	Environmental Management	10.1007/s00267-015-0611-0	poissons	Morphologique, Climatique, Occupation du sol	Multicollinearity test, algorithm Random Forest	Poissons d'eau douce, Ecoulement, Occupation du sol, Information multiple, Arbre de régression, Fish IBI.
15	Effects of geomorphology, habitat, and spatial location on fish assemblages in a watershed in Ohio, USA	D'Ambrosio, Williams, Witter et al	2009	Environmental Monitoring and Assessment	10.1007/s10661-008-0163-3	poissons	Habitationnel, Occupation du sol, Morphologique, Physico-chimique	Multicollinearity test, linear regression, CCA	Abondance et communauté ichtyologique, Habitat, Géomorphologie, Cours d'eau de centre-ouest des USA, Localisation spatiale, Canonical correspondence analysis (CCA).
16	Stressor prioritisation in riverine ecosystems: Which environmental factors shape benthic invertebrate assemblage metrics?	Sundermann, Gerhardt,	2013	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2012.12.003	macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Occupation du sol, Morphologique, Habitationnel	PCA, MLR, linear regression model	Indices biologiques, Usages du sol, Structure des habitats au niveau local, Restauration, Qualité de l'eau.

		Kappes et al							
17	The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers	Marzin, Verdonc hot, Pont	2013	Hydrobiologia	10.1007/s10750-012-1254-2	macroinvertébrés aquatiques, poissons	Climatique, Morphologique, Habitationnel, Physico-chimique, Occupation du sol	Multicollinearity test, pRDA	Analyse par redondance, Usage des sols, Pressions anthropiques, Poissons, Macroinvertébrés, France.
18	Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters	Lake	2003	Freshwater Biology	10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x	macroinvertébrés aquatiques, poissons	Climatique	ND	Sécheresse, Impacts, Perturbation, Rétablissement, Cours d'eau.
19	Watershed, reach, and riparian influences on stream fish assemblages in the Northern Lakes and Forest Ecoregion, U.S.A.	Wang, Lyons, Rasmussen et al	2003	Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences	10.1139/f03-043	poissons	Climatique, Occupation du sol, Morphologique, Habitationnel, Physico-chimique	CCA, RDA, DCA	Poissons, Échelle spatiale, Fish IBI, Facteurs environnementaux multiples.
20	Stream channel geomorphology influences mussel abundance in southern Appalachian streams, U.S.A.	Gangloff, Feminella	2007	Freshwater Biology	10.1111/j.1365-2427.2006.01673.x	macroinvertébrés aquatiques	Climatique, Hydraulique, Morphologique, Habitationnel	PCA, MLR	Alabama, Inondations, Habitat, Contrainte de cisaillement, Géomorphologie de cours d'eau, Unionidae.
21	Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems	Allan	2004	Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics	10.1146/aannurev.ecolsys.35.120202.110122	/	Habitationnel, Physico-chimique, Climatique, Occupation du sol	ND	Bassin versant, Perturbation, Réponse à un stress, Etat de cours d'eau, rivière.
22	Assessing the effectiveness of enhancement activities in urban streams: II. Responses of invertebrate communities	Suren, McMurtrie	2005	River Research and Applications	10.1002/rra.817	macroinvertébrés aquatiques	Occupation du sol	NPMANOVA	Cours d'eau urbain, Amélioration, Invertébrés, Recolonisation, Sédiments, MCI (macroinvertebrate community index), UCI (urban community index).
23	The impact of hydromorphological restoration on river ecological status: a comparison of fish, benthic invertebrates, and macrophytes	Haase, Hering, Jähnig et al	2013	Hydrobiologia	10.1007/s10750-012-1255-1	macroinvertébrés aquatiques, poissons, macrophytes	Morphologie, Habitationnel	DCA, PCA, Wilcoxon signed-rank test	Macroinvertébrés, Aménagement de cours d'eau, Directive Cadre sur l'Eau, Amélioration.
24	Does forest restoration assist the recovery of threatened species? A study of cloud forest amphibian communities	Díaz-García, López-Barrera, Toledo-	2020	Biological Conservation	10.1016/j.biocon.2019.108400	amphibiens	Habitationnel	GLM, PERMANOVA	Restauration active, Rétablissement de la faune, Restauration passive, Forêt tropicale, Forêt secondaire, Mexique.

		Aceves et al							
25	What are the impacts on temperate fish productivity of shoreline works activities? A systematic review protocol	Abdel-Fattah, Hasnain	2017	Environmental Evidence	10.1186/s13750-017-0110-2	poissons	Morphologique, Physico-chimique, Habitationnel, Climatique	ND	Côte, Système aquatique, Altération de l'habitat, Modification, Projet, Restauration, Perturbation.
26	Long-term fish community response to a reach-scale stream restoration	Shirey, Brueske, Kenny et al	2016	Ecology and Society	10.5751/ES-08584-210311	poissons	Habitationnel, Hydraulique	NMDS	Conservation, Pêche, Suivi sur le long terme, Projet de restauration, Ecologie des cours d'eau.
27	How strong is the evidence – based on macroinvertebrate community responses – that river restoration works?	Al-Zankana, Matheson	2019	Ecology & Hydrobiology	10.1016/j.ecohyd.2019.11.001	macroinvertébrés aquatiques	Morphologique, Habitationnel	ND	Biodiversité, Restructuration de chenal, Hydromorphologie, Débris ligneux, Réhabilitation de cours d'eau.
28	Nekton communities of tidally restored marshes: A whole-estuary approach	Lechêne, Boët, Laffaille et al	2018	Estuarine, Coastal and Shelf Science	10.1016/j.eccs.2017.08.038	poissons, macroinvertébrés aquatiques	Physico-chimique, Habitationnel	NMDS, db-MRT	Décapodes, Espèces indicatrices, Zones humides, Environnement intertidal, Restauration, Europe.
29	Diverging response patterns of terrestrial and aquatic species to hydromorphological restoration	Pilotto, Tonkin, Januschke et al	2019	Conservation Biology	10.1111/cobi.13176	poissons, macrophytes, macroinvertébrés aquatiques, invertébrés terrestres, végétation terrestre	Morphologique	PERMANOVA, linear models	Diversité fonctionnelle, Diversité multi-biotique, Végétation rivulaire, Plaine d'inondation, Restauration de cours d'eau, Composition taxonomique, Traits.
30	Characterizing fish responses to a river restoration over 21 years based on species' traits	Höckendorf, Tonkin, Haase et al	2017	Conservation Biology	10.1111/cobi.12908	poissons	Morphologique, Habitationnel	Bioenv analysis, PCoA, SegNeigh method	Analyse bioenv, Suivi sur le long terme, Réaction de dépassement, Bassin d'espèces régionales, Restauration de cours d'eau.
31	Explore the relationship between fish community and environmental factors by machine learning techniques	Hu, Tsai, Cheng et al	2020	Environmental Research	10.1016/j.envres.2020.109262	poissons	Physico-chimique, Habitationnel	ANOVA, GT, ANFIS	Machine learning, Aménagement environnemental durable, Qualité de l'eau, Régime d'écoulement, Adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS).
32	Impacts of Shallow Lake Restoration on Vegetation and Breeding Birds in Iowa	Vanausdal, Dinsmore	2019	Wetlands	10.1007/s13157-018-1120-8	macrophytes, oiseaux	Habitationnel	GLMMs	Oiseaux nicheurs des marais, Restauration, Végétation de zones humides.

33	Hydrologic Variability Governs Population Dynamics of a Vulnerable Amphibian in an Arid Environment	Zylstra et al	2015	Plos One	10.1371/journal.pone.0125670	amphibiens	Climatique, Morphologique, Habitationnel	Parameterized global model, GLMs, Quadratic terms	Amphibiens, Environnement aride, Condition hydrologique, Survie.
34	Influence of Vegetation on Montane Riparian Bird Communities in the Sky Islands of Arizona, Usa	Powell, Steidl	2015	Southwestern Naturalist	10.1894/MCG-09.1	oiseaux	Habitationnel	MLR, PCA	Oiseaux, Végétation rivulaire, Composition floristique, Structure des végétaux.
35	Effect of Hydrologic, Geomorphic, and Vegetative Conditions on Avian Communities in The Middle Rio Grande of New Mexico	Hamilton et al	2019	Wetlands	10.1007/s13157-019-01156-9	oiseaux	Morphologique, Climatique, Habitationnel	GLMMs, N-mixture model	Oiseaux, Géomorphologie, Hydrologie, Végétation rivulaire, Rio Grande.
36	Projecting avian response to linked changes in groundwater and riparian floodplain vegetation along a dryland river: a scenario analysis	Brand et al	2011	Ecohydrology	10.1002/eeco.143	oiseaux	Climatique, Habitationnel	SFT, DSS, regression analyse	Abondance des oiseaux, Populus, Ecohydrologie, Cours d'eau asséché, Sous-sol, Végétation rivulaire, Tamarix, Modélisation de scénarios, Technique space-for-time substitution.
37	Reptile community responses to native and non-native riparian forests and disturbance along two rivers in Arizona	Bateman, Riddle	2020	River Research and Applications	10.1002/rra.3587	reptiles	Habitationnel	NMDS, PCA, MLR	Biodiversité, Rivière Gila, Mesquite, Végétation exotique, Tamarix, Rivière San Pedro, Squamate, Feu de forêt.
38	Avian Density and Nest Survival on the San Pedro River: Importance of Vegetation Type and Hydrologic Regime	Brand, Stromberg, Noon	2010	Journal of Wildlife Management	10.2193/2008-217	oiseaux	Climatique, Habitationnel	regression analyse, Geary's C analysis, GLMs	Tohi d'Abert, Abondance, Arizona, Viréo de Bell, Peuplier, Mesquite, Végétation rivulaire, Tamarix, Eau en surface, Paruline polyglotte.

Annexe 5 Grille d'aide XLSTAT

Tableau 12 Extrait de la grille d'aide XLSTAT pour choisir une méthode d'analyse statistique multivariée.

Outil	Type de problématique	Nombre de tableaux	Description des données	Remarques
AFC	Exploratoire	1	Tableau de contingence	/
ACP	Exploratoire	1	Variables quantitatives uniquement	Prend en compte toutes la variance comprise dans les données ; les composantes ne reflètent pas nécessairement des phénomènes réels
Régressions	Décisionnelle	1	Une variable à expliquer et plusieurs variables explicatives quantitatives et/ou qualitatives	/
NMDS/PCoA	Exploratoire	1	Matrice de proximité	/
ACC	Exploratoire ou décisionnelle	2	Un tableau de contingence (Y) et un tableau explicatif (X) de variables quantitatives et/ou qualitatives	Liens unimodaux entre X et Y ; peut être utilisé pour décrire les niches d'espèces le long de gradients environnementaux
RDA	Décisionnelle	2	Un tableau de variables à expliquer (Y) et un tableau explicatif (X) de variables explicatives quantitatives et/ou qualitatives	Liens linéaires entre X et Y

En ce qui concerne la fiche des analyses inter-intraclasses, celle-ci est issue de la fiche thématique 2.6 sur le logiciel ADE4 par Dolédec et Chessel (1998) et l'exemple d'application d'une publication sur les conceptions des enseignants de différents pays de Castéra, Munoz, et Clement (2007).

Annexe 6 Synthèse sur les méthodes d'analyse (suite)

1/ L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

Fiche descriptive de la méthode :

➤ Présentation de la technique

L'Analyse Factorielle des Correspondances ou **AFC**, est utilisée lorsque l'on étudie deux variables qualitatives qui nous renseignent sur les proportions ou les profils de plusieurs catégories.

But : Comparer les profils des catégories en fonction de l'inertie (ou dispersion) associée à chaque axe pour étudier l'association des lignes et des colonnes du tableau de données.

➤ Présentation du jeu de données

Un jeu de données d'une AFC est présenté sous forme d'un tableau de contingence avec en ligne et en colonne des données de nature qualitative.

➤ Particularités de la méthode

L'AFC peut être utilisée avant une analyse canonique des correspondances (voir 3.3.1).

Dans le cas où l'on dispose de plus de deux variables qualitatives, l'on préfère utiliser une Analyse des Correspondances Multiples ou ACM.

➤ Représentation graphique des résultats

L'association des variables est représentée sur un graphique symétrique sur lequel apparaît les points correspondant aux lignes, et ceux correspondant aux colonnes. Ainsi, la distance entre les catégories donne une idée de leur association. Enfin, le graphique permet aussi de repérer les profils similaires au sein d'une catégorie.

Exemples d'application de la méthode

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT qui fournit de nombreux tutoriels pour l'utilisation des statistiques multivariées. Toutes les informations, données, tableaux et diagrammes proviennent du tutoriel sur le site <https://help.xlstat.com>.

Tableau 13 Jeu de données de l'AFC du tutoriel XLSTAT.

	Mauvais	Moyen	Bon	Très bon
16-24	69	49	48	41
25-34	148	45	14	22
35-44	170	65	12	29
45-54	159	57	12	28
55-64	122	26	6	18
65-74	106	21	5	23
75+	40	7	1	14

Les données correspondent à une enquête dans laquelle les personnes interrogées donnent leurs opinions sur un film qu'elles viennent de voir. On leur demande également leur tranche d'âge.

But : Etudier l'association entre deux variables (lignes et colonnes d'un tableau de contingence) et les similitudes entre les catégories de chaque variable respectivement (lignes et colonnes respectivement).

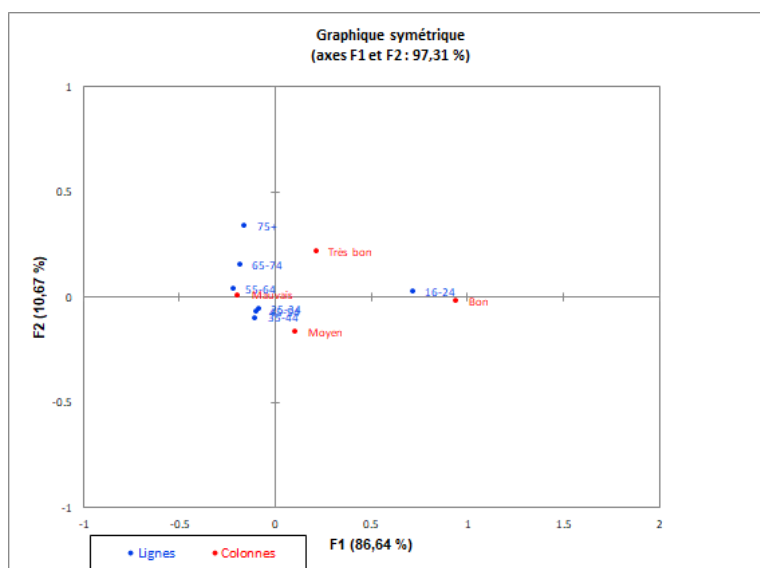


Figure 26 Résultats de l'AFC sous la forme de graphique symétrique.

Les groupes d'âge 25-34, 35-44 et 45-54 sont presque superposés, indiquant des profils très similaires.

En terme de proportion on peut donc dire que le film a été plus perçu comme bon chez les 16-24 ans, plutôt moyen chez les groupes 25-34, 35-44 et 45-54 et comme très bon chez les personnes plus âgées.

Application possible de la méthode pour les données des boires ?

Plusieurs AFC ont déjà été appliquées aux données faunistiques des boires (Colas et Bacchi, 2019).

Concernant les peuplements piscicoles sur toute la période du suivi (de 2016 à 2018), l'AFC a mis en évidence que la composition du peuplement n'était pas significativement différente entre les boires suivant les années.

Concernant les macroinvertébrés, l'AFC a permis de souligner un fort impact temporel sur la composition du peuplement. En effet, les peuplements des années 2016, 2017 et 2018 se différencient grandement démontrant ainsi que les macroinvertébrés seraient très influencés par les conditions mésologiques propres à chaque année.

2/Les analyses inter-intraclasse

Fiche descriptive de la méthode

➤ Présentation de la technique

Les analyses inter-intraclasse sont utilisées lorsque l'on souhaite dégager des réponses différentes des variables en fonction des groupes mis en évidence dans une étude.

But d'une analyse **interclasse** : Mettre en évidence les variables qui différencient le plus les groupes. On souhaite mettre l'accent sur ce qui discrimine les groupes.

But d'une analyse **intraclasse** : Mettre en évidence les variables faisant varier les données au sein des groupes. Un des objectifs peut être par la suite de supprimer l'effet de cette variable qui empêcherait d'analyser correctement les données entre les groupes.

➤ Présentation du jeu de données

Le jeu de données se présente sous la forme du jeu de donnée de l'analyse qu'elle accompagne (ex : pour une ACP, un tableau de contingence à m observations et n variables).

➤ Particularités de la méthode

Les analyses inter-intraclasse accompagnent généralement les analyses multivariées pour identifier des groupes (ou classes) et les variables les plus discriminantes entre et au sein de ces groupes.

La décomposition de la variance (d'une Analyse en Composantes Principales ACP ou AFC) par l'utilisation des valeurs propres, peut permettre d'identifier les variables les plus impactantes. La figure suivante est issue de la fiche thématique 2.6 (Dolédec et Chessel, 1998) sur l'utilisation du logiciel ADE4, avec lequel a été étudié l'influence du temps et du lieu sur une analyse en composantes principales de données faunistiques.

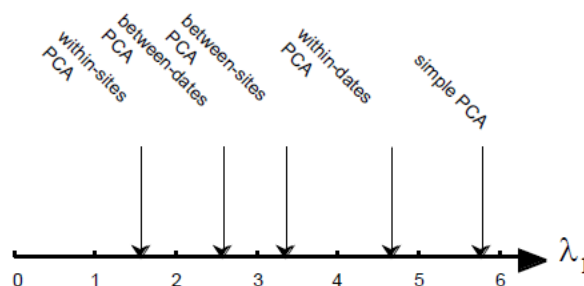


Figure 27 Premières valeurs propres (λ_1) des analyses ACP et inter-intraclasse issues de la fiche thématique 2.6 par Dolédec et Chessel (1998).

Ainsi, on constate qu'au sein des groupes, le facteur spatial influence en grande partie la variabilité des données faunistiques (within-sites PCA proche de 1), alors qu'au contraire entre les groupes, c'est le facteur temporel qui semble influencer plus fortement (between-dates PCA).

➤ Représentation graphique des résultats

Les résultats se présentent sous forme de diagramme de distribution à deux dimensions issues de l'analyse multivariée.

Exemples d'application de la méthode

L'exemple d'application suivant provient d'une étude d'analyse inter-intraclasse après une ACP, réalisée à Strasbourg en 2007 par Castéra, Munoz, et Clement (2007).

Tableau 14 Jeu de données de l'étude de François Munoz et Pierre Clément.

Pays	InB	InL	InP	PreB	PreL	PreP	Total
PT-Portugal	49	62	67	53	61	59	351
FI-Finlande	66	28	32	55	69	56	306
HU-Hongrie	52	68	52	56	57	49	334
LI-Lituanie	48	58	59	50	48	53	316
MT-Malte	27	51	53	14	27	26	198
PL-Pologne	50	57	53	50	48	53	311
RO-Roumanie	44	42	46	49	45	47	273
MA-Maroc	66	42	49	62	50	61	330
FR-France	100	110	114	149	101	158	732
SN-Sénégal	52	54	54	62	51	51	324
GE-Allemagne	55	80	60	54	51	65	365
IT-Italie	53	107	97	66	54	182	559
CY-Chypre	38	97	27	25	60	75	322
ES-Estonie	31	31	31	30	30	30	183
LB-Liban	153	111	246	59	56	97	722
TN-Tunisie	125	116	106	193	110	103	753

L'objectif du questionnaire Biohead-Citizen est l'étude des conceptions d'enseignants et futurs enseignants en tant qu'interaction entre connaissances scientifiques (K), valeurs (V) et pratiques

sociales (P) (modèle KVP ; Clément, 1998, 2004). Nous traitons des thèmes relatifs à des questions vives sur l'éducation à l'environnement, à la santé et à la biologie. Nous étudions également le lien entre ces conceptions et des paramètres individuels contrôlés (âge, sexe, niveau de formation, matière enseignée, croyance religieuse, opinions politiques, économiques et sur la défense de l'environnement...).

Tableau : Effectifs des échantillons dans le cadre de la recherche Biohead-Citizen, par pays (lignes) et par groupes d'enseignement (colonnes). InB = enseignants en exercice dans le secondaire en biologie, PreB = futurs enseignants dans le secondaire en biologie, InL = enseignants en exercice dans le secondaire en lettres, PreL = futurs enseignants dans le secondaire en lettres, InP = enseignants en exercice dans le primaire, PreL = futurs enseignants dans le primaire.

But : Identifier les principales orientations conceptionnelles qui émergent de l'ensemble des réponses, c'est-à-dire des ensembles cohérents de réponses traduisant des conceptions particulières.

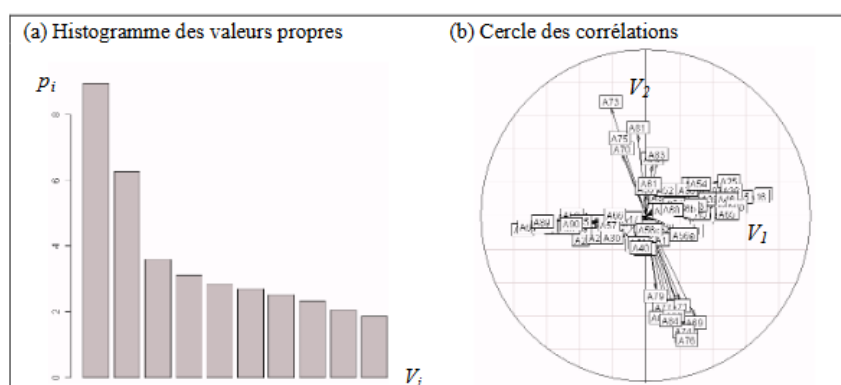


Figure 28 Résultats de l'ACP.

L'histogramme des valeurs propres (a) représente la variance des individus exprimée par les composantes successives V_i issues de l'analyse. Le cercle des corrélations (b) représente la relation entre les deux premières composantes V_1 et V_2 et les questions, afin d'éclairer la signification de V_1 et V_2 (ici deux orientations conceptionnelles remarquables).

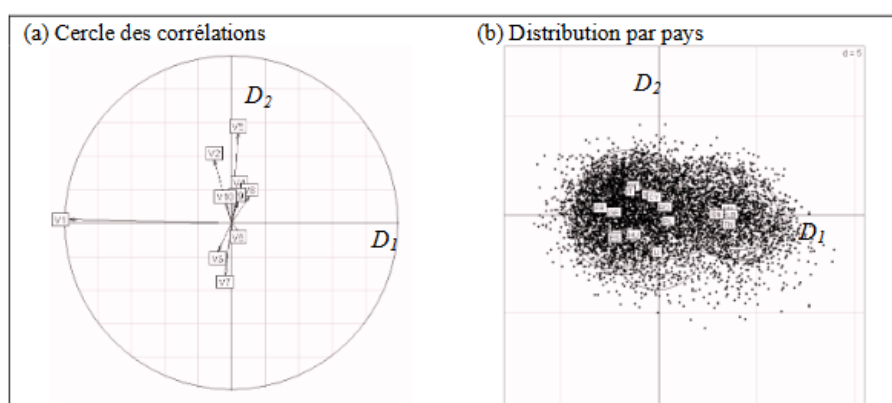


Figure 29 Résultats de l'analyse interclasse

Le cercle des corrélations (a) identifie la relation entre les axes discriminants prépondérants (D_1 , abscisses, et D_2 , ordonnées). La distribution des individus (b) est représentée dans le plan (D_1 , D_2) et les composantes V_i issues de l'Analyse en Composantes Principales, en fonction de l'appartenance nationale : le label des pays est situé au centre des groupes nationaux. Une ellipse enveloppe la majorité des individus pour chaque pays.

Nous testons l'hypothèse nulle d'absence de différenciation entre pays au moyen d'une procédure de type Monte-Carlo (test non paramétrique ; Romesburg, 1985). Nous rejetons au seuil de 0.1% l'hypothèse nulle, et concluons à l'existence de différences de conceptions significatives entre pays.

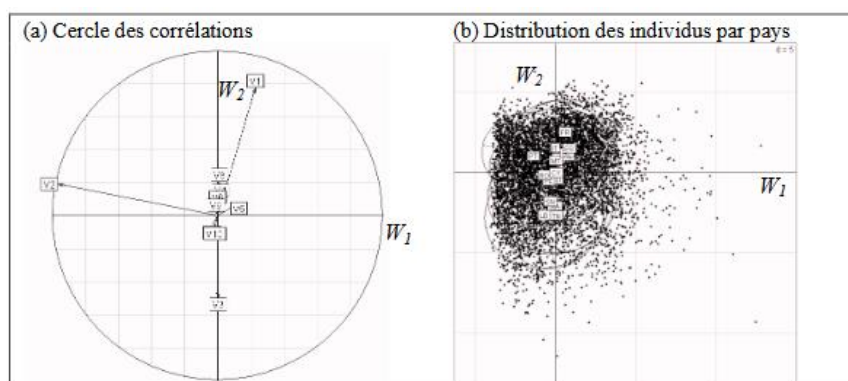


Figure 30 Résultats de l'analyse intraclasse.

Le cercle des corrélations (a) identifie la relation entre les axes prépondérants (W_1 , abscisses, et W_2 , ordonnées). La distribution des individus (b) est représentée dans le plan (W_1 , W_2) et les composantes V_i issues de l'Analyse en Composantes Principales, en fonction de l'appartenance nationale : le label des pays est situé au centre des groupes nationaux. Une ellipse enveloppe la majorité des individus pour chaque pays.

L'orientation conceptionnelle « consensuelle » est clairement associée à la composante V_2 de l'ACP initiale. Cela signifie que la perception de la nature et de l'environnement (une des orientations) est très largement indépendante de la nationalité des individus, mais varie beaucoup au sein des pays. A contrario, la composante V_1 de l'ACP est associée à une variation à la fois entre pays et au sein des pays, à travers W_2 . Nous montrons ainsi que les deux orientations conceptionnelles issues de l'ACP initiale, V_1 et V_2 , représentent essentiellement la différenciation des individus entre les pays et au sein des pays

Application possible de la méthode pour les données des boires ?

Des analyses inter et intraclasse ont été appliquées suite à l'analyse factorielle des données de macroinvertébrés (Colas et Bacchi, 2019). Cependant, celles-ci n'ont pas permis de mettre en évidence de composantes qui expliqueraient les variations dans les peuplements.

3/L'Analyses en Composantes Principales (ACP)

Fiche descriptive de la méthode

➤ Présentation de la technique

L'Analyse en Composantes Principales ou **ACP**, fait partie des techniques d'analyse indirectes de gradient, dit aussi analyse à ordination non contrainte.

But : Décrire une matrice de données en réduisant ses dimensions ou axes et étudier les corrélations entre les variables.

➤ Présentation du jeu de données

Un jeu de données pour une ACP se présente sous la forme d'un tableau à m observations et n variables (matrice de données de communauté).

Les données utilisées doivent être de nature quantitative mais une standardisation est requise si l'unité est différente.

➤ Particularités de la méthode

Pour projeter les variables dans un nouvel espace avec moins de dimensions, l'ACP fait intervenir le coefficient de corrélation de Pearson comme indice de similarité entre les variables.

L'ACP est une technique qui peut être utilisée avant une régression pour éviter l'utilisation de variables redondantes ou pour identifier la structure des populations en créant des regroupements par exemple.

➤ Représentation graphique des résultats

La représentation graphique de l'ACP est un diagramme constitué du cercle des corrélations sur lequel les variables ont été projetées sur un plan en deux dimensions (les 2 axes avec le plus de « pourcentage explicatif »).

En fonction de la position des variables sur le diagramme, il est possible d'identifier les corrélations négatives et positives entre elles. Ainsi, deux variables orientées dans le même sens seront positivement corrélées alors que deux variables orientées dans des sens opposés seront négativement corrélées. De plus, la corrélation est absente lorsque deux variables présentent un angle droit entre elles. Enfin, une ACP permet de visualiser les tendances des observations sur le diagramme en deux dimensions.

Exemples d'application de la méthode

➤ Application XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT :

Tableau 15 Extrait du jeu de données ACP du tutoriel XLSTAT

Etat	Population totale	Immigration domestique nette	Américains migrants avec l'étranger	Immigration internationale nette	Taux de naissance	Taux de mortalité	Pop < 65 ans	Pop > 65 ans
Alabama	4464356	-1.78	-0.02	0.69	14.41	10.28	869.21	130.79
Alaska	634892	-1.72	-0.24	2.09	15.95	4.64	941.95	58.05
Arizona	5307331	14.25	-0.03	4.29	15.88	7.77	869.54	130.46
Arkansas	2692090	0.36	-0.01	1.07	14.35	10.51	861.06	138.94
California	34501130	-2.01	-0.04	7.88	15.37	6.72	894.03	105.97
Colorado	4417714	9.32	-0.06	3.57	14.57	6.26	903.52	96.48
Connecticut	3425074	-2.37	-0.02	3.50	12.52	9.00	862.64	137.36
Delaware	796165	5.39	-0.04	2.12	14.01	8.79	869.45	130.55
District of Columbia	571822	-7.77	-0.07	5.73	14.33	10.76	880.75	119.25
Florida	16396515	12.52	-0.03	5.76	12.54	10.13	826.28	173.72
Georgia	8383915	7.07	-0.07	2.71	16.16	7.75	904.37	95.63
Hawaii	1224398	-2.50	-0.29	4.32	15.44	6.87	866.18	133.82
Idaho	1321006	6.40	-0.03	2.24	15.00	7.34	887.18	112.82
Illinois	12482301	-7.28	-0.02	4.76	14.87	8.72	880.26	119.74
Indiana	6114745	-1.99	0.00	1.23	14.08	9.19	876.78	123.22
Iowa	2923179	-5.68	0.00	1.21	12.83	9.70	851.89	148.11
Kansas	2694641	-6.36	-0.05	2.28	14.53	9.35	868.32	131.68
Kentucky	4065556	0.15	-0.06	0.75	13.63	9.89	875.51	124.49
Louisiana	4465430	-7.98	-0.04	0.70	15.69	9.37	884.16	115.84
Maine	1286670	6.62	-0.02	0.58	10.31	9.79	856.33	143.67
Maryland	5375156	2.18	-0.06	4.02	14.16	8.30	886.72	113.28
Massachusetts	6379304	-3.25	-0.01	3.24	12.72	9.02	865.26	134.74

Les données correspondent à la mesure de paramètres démographiques dans 51 Etats des Etats-Unis en 2000 et 2001. Dans le cadre de ce tutoriel, seules les données de l'année 2001 ont été conservées, et afin de supprimer les effets d'échelle, les variables initiales ont été converties en taux pour 1000 habitants.

But : Analyser les corrélations entre les variables et identifier les états se différenciant fortement des autres.

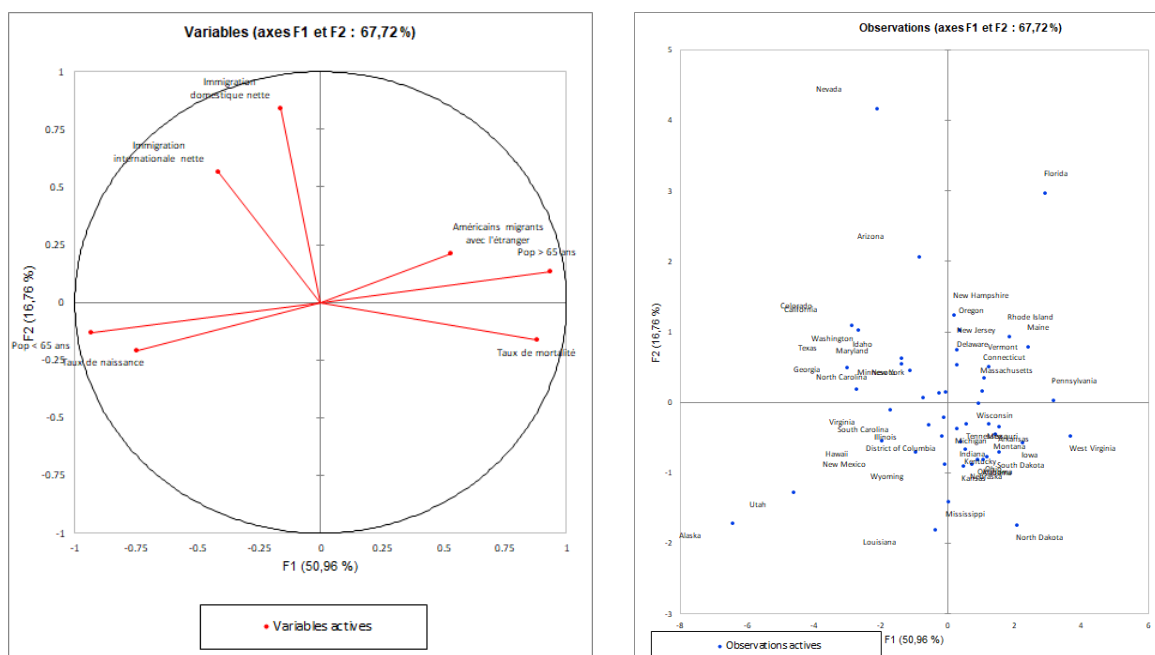


Figure 31 Représentations graphiques des variables (1) et des observations (2) sur un diagramme à deux dimensions.

Dans notre exemple, nous pourrions déduire du graphique (1) que les variables Immigration domestique, et Immigration Internationale sont corrélées, alors qu'elles ne le sont pas, ce que l'on peut voir sur la matrice des corrélations ou sur le cercle des corrélations sur les axes F1 et F2. En revanche, on voit bien la forte corrélation entre le taux de mortalité et le taux de personnes dont l'âge est supérieur à 65 ans.

Le cercle des corrélations est aussi utile pour interpréter la signification des axes. Dans notre cas, l'axe F1 est clairement lié à l'âge de la population et à son renouvellement, alors que l'axe F2 est essentiellement lié à l'immigration domestique. Ces tendances sont particulièrement intéressantes à dégager pour l'interprétation du graphique des individus.

On voit sur le graphique (2) que sur la base des variables démographiques dont on dispose, le Nevada et la Floride sont assez particuliers, de même que l'Utah et l'Alaska qui semblent partager des caractéristiques : en regardant les données, on s'aperçoit que ces deux états ont une population nettement plus jeune que la moyenne, et une natalité très élevée.

Les deux graphiques précédents peuvent être regroupés en un même diagramme appelé « diagramme biplot »

➤ Application dans la littérature scientifique

Il apparaît que l'analyse en composantes principales est aussi une méthode utilisée pour diminuer le nombre de variables environnementales. En effet, lorsque le nombre de composants à prendre en compte est important pour la suite des analyses, l'ACP permet de souligner les variables qui sont très corrélées aux réponses biologiques (García-Roger *et al.*, 2013 ; Sundermann *et al.*, 2013 ; Gangloff et Feminella, 2007; Powell et Steidl, 2015; Bateman et Riddle, 2020).

Enfin, comme avec l'exemple de XLSAT sur les pays, l'ACP permet d'accéder à une représentation 2D de la composition ou des caractéristiques communes des peuplements d'animaux et de végétaux (Powell et Steidl, 2015), ainsi que de métriques environnementales comme l'hydromorphologie face à un projet de restauration (Haase *et al.*, 2013).

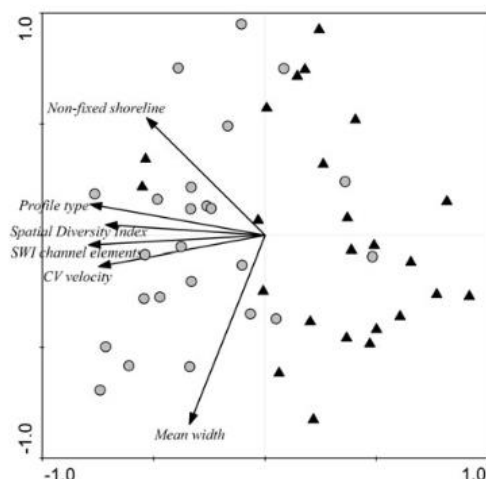


Fig. 1 Principal component analysis of six complementary hydromorphological measures at 48 stream sections; SWI Shannon–Wiener Index, CV coefficient of variation. Prior to analysis, profile type was square root transformed, and non-fixed shoreline (%) and mean width (m) were arcsin-square root and log-transformed, respectively; other variables were not transformed. The first and second PCA axes explain 45.2 % and 17.3 %, respectively, of the variance in the morphological data set. *Black triangles* represent unrestored sections and *gray circles* represent restored sections

Figure 32 Résultat de l'ACP issu de Haase et al. (2013) illustrant la significative séparation de l'hydromorphologie des sites restaurés (ronds gris et de ceux non restaurés (triangles noirs).

Application possible de la méthode pour les données des boires ?

Plusieurs ACP ont été appliquées pour identifier les facteurs explicatifs des différences de peuplement des macroinvertébrés entre les boires (Colas et Bacchi, 2019). En 2017, l'abondance et le nombre d'EPT sont apparus comme étant les facteurs biologiques les plus explicatifs. Cependant, ces résultats paraissent très dépendants des conditions de prélèvement, l'explication de la variabilité devient donc limitée uniquement avec une ACP.

4/Les Régressions linéaires (SLR et MLR) et les Régressions généralisées (GLM et GLMM)

Fiche descriptive des méthodes de régression linéaire simple et multiple

➤ Présentation de la technique

Les régressions linéaires se distinguent entre régression linéaire simple (**SLR** pour « Simple Linear Regression ») et régression linéaire multiple (**MLR** pour « Multiple Linear Regression »). La distinction se fait suivant le nombre de variables explicatives étudiées (une seule pour la régression simple et plusieurs pour la régression multiple).

But : Modéliser et mettre en évidence des relations linéaires entre une variable réponse quantitative et une ou plusieurs variables explicatives aussi de nature quantitative.

La relation s'écrit de la forme :

$$y_i = a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_px_{pi} + e_i$$

où y_i est la valeur observée pour la variable réponse pour l'observation i , x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'observation i , et e_i est l'erreur du modèle.

➤ Présentation du jeu de données

Le jeu de données d'une régression linéaire se présente sous forme d'un tableau à plusieurs colonnes renseignant les données quantitatives des observations et des variables explicatives.

➤ Particularités de la méthode

Il est possible d'utiliser une régression linéaire sans « cadre statistique ». Cependant, trouver un sens à la relation linéaire entre les variables devient alors moins évidente. C'est pourquoi les régressions accompagnent généralement d'autres analyses comme les ACP ou les ACC (Analyse Canonique des Correspondances).

La régression PLS des moindres carrés, permet de diminuer l'erreur du modèle linéaire et fournit une meilleure estimation du pouvoir explicatif des variables explicatives lorsqu'elles sont plusieurs. Cela permet de donner à la régression un pouvoir prévisionnel.

➤ Représentation graphique des résultats

La représentation graphique d'une régression linéaire se matérialise par une droite de régression dans le cas où la variable explicative est seule.

Dans le cas de plusieurs variables explicatives, le coefficient de détermination (R^2) renseigne sur le pourcentage de variabilité expliquée par les variables.

L'analyse s'accompagne d'un test de Fisher permettant d'avoir une idée de la significativité du modèle et d'un test de Student permettant d'avoir une idée sur l'importance de l'impact de chaque variable explicative sur le modèle.

Enfin, le comportement des résidus est visualisable sur un graphe en fonction de la variable réponse et un diagramme bâton représentant les résidus centrés réduits, permet de visualiser si certaines valeurs sortent de l'intervalle de confiance (car le modèle est sous hypothèse d'une loi normale).

Fiche descriptive des GLM et GLMM

➤ Présentation de la technique

Le modèle linéaire généralisé abrégé par **GLM** pour « Generalized Linear Model » fait partie des méthodes indirectes de gradient. Ici, on se place dans une situation où une seule variable réponse est en relation avec plusieurs variables explicatives ou prédictives.

But : Modéliser les relations entre des données de comptage et une variable réponse et plusieurs variables explicatives, lorsque la distribution ne suit pas une loi Normale mais une loi de Poisson (d'où le nom parfois de régression de Poisson).

Cette régression est appelée aussi « log-linéaire » car la variable de réponse s'écrit comme le logarithme d'une fonction affine des variables explicatives (XLSTAT).

➤ Présentation du jeu de données

Le jeu de données d'un GLM se présente sous forme d'un tableau avec les colonnes des données des variables explicatives et la colonne des données de comptage associées.

➤ Particularités de la méthode

Contrairement à une régression linéaire basique, le GLM évalue les effets des variables prédictives sur une réponse de type comptage, binaire ou proportionnelle, et non sur des données de type numérique continue.

Une des conditions d'utilisation d'un GLM est l'indépendance ou la non-corrélation des réponses (entre les lignes ou entre les jeux de données). Dans le cas où les données sont non indépendantes, il faut dans ce cas utiliser un **GLMM** pour « Generalized Linear Mixed Model » ou modèle linéaire généralisé mixte (<https://statistique-et-logiciel-r.com/tutoriel-glm-sur-donnees-de-comptage-regression-de-poisson-avec-r/>)

➤ Représentation graphique des résultats

Les résultats d'un GLM se présentent sous forme de tableau dans lequel on retrouve les valeurs de χ^2 apportant une information sur la significativité du modèle (correspond au test de F pour le modèle linéaire). Enfin, la p-value donne l'information quant à la significativité des variables explicatives pour expliquer le modèle.

Exemples d'application des méthodes

➤ Application MLR XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT :

Tableau 16 Extrait du jeu de données régression linéaire multiple issu de XLSTAT

Age	Height	Weight
143	56.3	85
191	62.5	112.5
160	62	94.5
157	64.5	123.5
191	65.3	107
141	61.8	85
185	63.3	101
210	65.5	140
149	64.3	110.5
169	62.3	99.5
173	62.8	102.5
150	61.3	94
144	59.5	93.5
146	60	109
155	61.3	107
183	64.5	102.5
154	60	114
152	60.5	105

Les données proviennent de Lewis T. and Taylor L.R. (1967). *Introduction to Experimental Ecology*, New York: Academic Press, Inc.. Elles concernent 237 enfants, décrits par leur sexe, leur âge en mois, leur taille en inch (1 inch = 2.54 cm), et leur poids en livres (1 livre = 0.45 kg).

But : Etudier comment le poids varie en fonction de la taille et de l'âge, et si une relation linéaire a un sens. Il s'agit ici d'une régression linéaire multiple, car deux variables explicatives sont utilisées (la taille et l'âge).

Tableau 17 Résultats de la régression linéaire multiple (R^2 , test F et valeurs à 95% d'intervalle) issu de XLSTAT.

Coefficients d'ajustement :					
R (coefficient)	0.767				
R^2 (coefficient)	0.588				
R^2 aj. (coeff)	0.581				
SCR	15688.836				

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$) :					
Source	ddl	forme des carrés moyen	F de Fisher	Pr > F	
Modèle	2	22432.272	11216.136	77.210	< 0.0001
Résidus	108	15688.836	145.267		
Total	110	38121.108			

Estimation des paramètres du modèle :					
Paramètre	Valeur	Ecart-type	t de Student	Pr > t	borne inf. à 95% / borne sup. à 95%
Constante	-150.597	20.767	-7.252	< 0.0001	-191.761 / -109.433
Age	0.191	0.076	2.524	0.013	0.041 / 0.340
Taille	3.604	0.408	8.838	0.000	2.796 / 4.412

L'équation du modèle est : $Y = -150.59682157596 + 0.190702507567477 \cdot \text{Age} + 3.60377963455303 \cdot \text{Taille}$

Dans notre cas, 58% de la variabilité est expliquée par la taille et l'âge. Le reste de la variabilité est dû à des effets (autres variables explicatives) qui ne sont pas pris en compte dans cet exemple

Etant donnée que la probabilité associée au F est dans ce cas inférieure à 0.0001, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de moins de 0.01% en concluant que les variables explicatives apportent une quantité d'information significative au modèle.

Nous voyons que la p-value associé au test de Student pour l'âge est d'environ 0.01, et que l'intervalle de confiance à 95% associé frôle la valeur 0. Cela confirme le faible impact de l'âge sur le modèle. Le modèle indique que dans les limites de l'intervalle de variation de la variable taille et de la variable âge données par les observations, à chaque fois que la taille augmente d'un inch, le poids augmente de 3.6 livres, et à chaque fois que l'âge augmente d'un mois, le poids augmente de 0.2 livres.

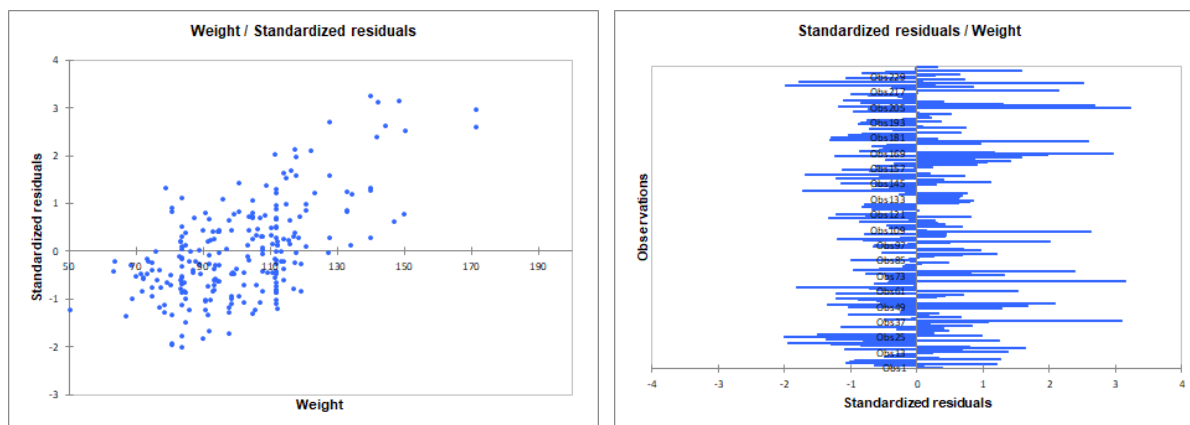


Figure 33 Représentation des résidus en fonction du poids et histogramme des résidus centrés réduits de la régression linéaire multiple issu de XLSTAT.

graphique permet de visualiser les résidus centrés réduits en fonction du Poids. Il semble indiquer que les résidus croissent en fonction du poids. L'histogramme des résidus centrés réduits permet de repérer rapidement et visuellement la présence de valeurs hors de l'intervalle [-2, 2].

➤ Application GLM XLSTAT

L'exemple d'application suivant provient du centre de support du site XLSTAT :

Tableau 18 Extrait du jeu de données régression log linéaire du tutoriel XLSTAT.

Number of awards	Program	Score in math
0	Vocational	40
0	Academic	43
0	Academic	49
1	General	44
1	General	46
0	Academic	46
1	Academic	41
0	General	42
0	Vocational	47
1	Academic	43
0	Academic	49
1	Vocational	40
1	Vocational	39
0	Vocational	49
0	Academic	42
0	General	43
0	Academic	41
0	General	57
0	Academic	50
0	Academic	44

Les données utilisées représentent le nombre de bourses obtenues par des étudiants d'une grande école. Pour expliquer le nombre de bourses obtenues, on dispose de deux prédicteurs qui sont

la note de l'examen de mathématique et le type de programme dans lequel l'étudiant est inscrit (professionnel, général ou académique).

But : Expliquer et/ou prédire le nombre de bourses obtenues par un étudiant.

Tableau 19 Résultats de la régression log linéaire sous forme de tableau sous XLSTAT.

Model parameters for the components (Variable Number of awards):						
Source	Value	Standard error	Wald Chi-Square	Pr > Chi²	Wald Lower bound (95%)	Wald Upper bound (95%)
Intercept	-4.877	0.628	60.283	< 0,0001	-6.109	-3.646
Score in math	0.070	0.011	43.806	< 0,0001	0.049	0.091
Program-Vocational	0.000	0.000				
Program-Academic	0.714	0.320	4.979	0.026	0.087	1.341
Program-General	-0.370	0.441	0.703	0.402	-1.234	0.495

Le tableau suivant donne la valeur estimée des différents coefficients pour le modèle ajusté. Un test de significativité est également donné pour chaque coefficient. Dans notre cas, ce test permet de conclure que le paramètre associé à la modalité « Programme-Général » n'est pas significativement différent de 0 (à un niveau 5%)

➤ Application dans la littérature scientifique

Dans la littérature et comme pour l'exemple XLSTAT, les GLM et GLMM sont utilisés dans plusieurs cas pour modéliser les réponses des variables. Hay *et al.* (2008) utilisent le GLMM pour modéliser la densité de macroinvertébrés, et Hamilton *et al.* (2019) utilisent l'utilise pour modéliser l'abondance des populations d'oiseaux. Enfin, Bateman et Riddle (2020) modélisent quant à eux l'abondance des squamates dans un contexte où les conditions des sites de capture changent (sites brûlés).

D'autres articles intègrent en plus des arbres de régression (type BRT pour « Boosted regression tree »), afin d'évaluer l'influence ou la contribution des variables explicatives par métrique biologique. C'est le cas pour Karaouzas *et al.* (2019), qui applique un GLM sur les métriques abondance et richesse spécifique, l'effet de ses 11 variables avec un arbre BRT.

Dans le cas où l'on s'intéresse à l'étude des variations inter-annuelles (Inoue, Stoeckl, et Geist, 2017 ; Zylstra *et al.*, 2015 ; Karaouzas *et al.*, 2019 ; Hay *et al.*, 2008 ; Hamilton *et al.*, 2019), il apparaît que le GLMM est la méthode largement appliquée du fait de la non indépendance des données.

Les MLR et les SLR quant à eux, sont souvent réalisées après des tests de collinéarité dans le but de réduire le nombre de variables (identifier un premier groupe de variables fortement corrélées à la métrique biologique), mais avant une ACC (D'Ambrosio *et al.*, 2009) ou une ACP (Sundermann *et al.*, 2013 ; Gangloff et Feminella, 2007 ; Powell et Steidl, 2015). Concernant la MLR, les auteurs cherchent parmi plusieurs variables celles faisant varier le plus les métriques étudiées. Ainsi, Powell et Steidl (2015) étudient comment la composition des oiseaux varie suivant la structure des végétaux ou la composition floristique (dans l'exemple XLSTAT il s'est avéré que la taille influe plus sur le poids que l'âge).

Enfin, les régressions linéaires servent aussi à tester la significativité des variables explicatives comme dans l'article de Sundermann *et al.* (2013).

La grande majorité des analyses de régression semblent être réalisées sous R (Hay *et al.*, 2008 ; Karaouzas *et al.*, 2019 ; García-Roger *et al.*, 2013 ; Díaz-García *et al.*, 2020 ; Vanausdall et Dinsmore, 2019 ; Zylstra *et al.*, 2015 ; Bateman et Riddle, 2020).

Application possible de la méthode pour les données des boires ?

Dans le cas où le nombre de variables environnementales est très important, les régressions pourraient être des méthodes intéressantes en première approche pour identifier les variables ayant le plus d'intérêt pour expliquer les réponses biologiques. Associées à des tests de corrélations, les

régressions permettent aussi de tester si les variables portent suffisamment d'informations pour être utilisées (tests de significativité).

Le choix entre les régressions est déterminé en fonction des problématiques suivantes :

- Si la distribution suit une loi Normale : Est-ce que la relation est entre une seule métrique biologique et une variable environnementale ou une combinaison de variables ? Dans le premier cas une simple régression linéaire peut suffire sinon elle sera multiple.
- Si la distribution suit une loi de Poisson : Les mesures sont-elles répétées sur plusieurs années ? Si oui, alors une GLM ou GLMM sera plus appropriée.

Dans le cas où certaines variables ne suivraient pas une loi Normale, il pourrait être envisagé de transformer les données avec un logarithme ($\log(x+1)$) comme pour Gangloff et Feminella (2007).

Au vu des données du milieu à disposition par la méthode CARHAB, le nombre de variable semble relativement peu important, l'utilisation d'une technique de régression ne semble pas nécessaire dans ce cas précis.

Annexe 7 Matrices des données mésologiques

Tableau 20 Matrice des données habitationnelles (pourcentages de recouvrement et vitesses) pour les boires avec un suivi piscicole en 2018 et 2019.

Code site	Substrat fin	Substrat grossier	Substrat organique	Vitesse
ANJ_01_2018	97.5	2.5	21.3	N1
ANJ_02_2018	99.8	0.2	4	N1
DRA_01_2018	100	0	0	N1
DRA_02_2018	99.2	0.8	3.4	N3
TREB_01_2018	88.2	11.8	2.9	N1
TREB_02_2018	87.9	12.1	1	N3
DAG_01_2018	100	0	62.2	N1
PAT_01_2019_AMONT	97.9	2.1	61.55	N1
PAT_02_2019_AVAL	92.09	7.91	11.33	N1
CHAM_01_2019	92.54	7.46	80.79	N1
CHAM_02_2019	95.26	4.74	77.5	N1
BUT_01_2019	100	0	92.43	N1

Tableau 21 Matrice des données habitationnelles (pourcentages de recouvrement et vitesses) pour les boires avec un suivi macrobenthique en 2018 et 2019.

	Substrat fin	Substrat grossier	Substrat organique	Vitesse
ANJ_1_AD_18	97.5	2.5	21.3	N1
ANJ_1_PR_18	97.5	2.5	21.3	N1
ANJ_2_AD_18	99.8	0.2	4	N1
ANJ_2_PR_18	99.8	0.2	4	N1
BEAU_1_AD_18	100	0	9	N1
BEAU_1_PR_18	100	0	9	N1
BEAU_2_AD_18	97.3	2.7	57.1	N1
BEAU_2_PR_18	97.3	2.7	57.1	N1
DAG_1_AD_18	100	0	62.2	N1
DAG_1_PR_18	100	0	62.2	N1
DRA_1_AD_CAMP2_18	100	0	0	N1
DRA_1_PR_CAMP2_18	100	0	0	N1
DRA_1_AD_CAMP1_18	100	0	47.2	N1
DRA_1_PR_CAMP1_18	100	0	47.2	N1
DRA_2_AD_18	99.2	0.8	3.4	N3
DRA_2_PR_18	99.2	0.8	3.4	N3
TREB_1_AD_18	88.2	11.8	2.9	N1
TREB_1_PR_18	89.2	10.8	2.9	N1
TREB_2_AD_18	87.9	12.1	1	N3
TREB_2_PR_18	87.9	12.1	1	N3
VIN_1_AD_CAMP1_18	96.4	3.6	3.8	N1
VIN_1_PR_CAMP1_18	96.4	3.6	3.8	N1
VIN_1_AD_CAMP2_18	96.1	3.9	2	N1
VIN_1_PR_CAMP2_18	96.1	3.9	2	N1
VIN_2_AD_CAMP1_18	89.6	10.4	1.1	N1
VIN_2_PR_CAMP1_18	89.6	10.4	1.1	N1
VIN_2_AD_CAMP2_18	96	4	1.6	N1
VIN_2_PR_CAMP2_18	96	4	1.6	N1
PAT_1_PR_19	97.9	2.1	61.55	N1
PAT_1_AD_19	97.9	2.1	61.55	N1
PAT_2_PR_19	92.09	7.91	11.33	N1
PAT_2_AD_19	92.09	7.91	11.33	N1

Annexe 8 Matrices des données biologiques

Tableau 22 Effectifs des espèces piscicoles sur les boires entre 2016 et 2019.

Code site	ABL	ANG	BAF	BOU	BRB	BRE	BRO	CAA	CAS	CMI	CCO	CHE	EPI	EPT	FLE	GAM	GAR	GOU	GRE	GOB	HOT	IDE	MUP	PCH	PER	PES	PSR	ROT	SAN	SPI	TAN	VAI	VAN	
SEB_01_2016	0	28	0	0	0	0	0	0	0	1	11	2	281	0	5	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SEB_02_2016	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	249	0	7	0	4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
MAUV_01_2016	0	2	0	3	0	1	2	0	10	1	0	42	1	0	1	2	87	0	42	0	0	2	0	0	0	0	6	2	0	0	0	0	0	
MAUV_02_2016	0	1	0	8	0	3	0	0	14	0	9	0	88	1	0	4	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
CEL_01_2016	5	5	0	4	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	430	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	
CHAM_01_2016	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CHAM_02_2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CIR_01_2016	1	0	0	15	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	11	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
CIR_02_2016	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
POST_01_2016	0	0	0	76	0	1	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
POST_02_2016	18	0	0	15	0	12	1	0	23	0	0	15	0	0	0	0	17	28	0	0	0	0	0	45	0	2	2	1	0	2	0	0	0	
CHAP_03&03_2017	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	8	0	31	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
CIR_02_2017	2	3	0	2	0	0	5	0	0	0	0	4	5	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CIR_03_2017	0	3	0	39	7	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	3	5	1	0	0	0	0	0	0	0	8	1	0	1	1	0	0	
SAV_01_2017	0	11	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	3	1	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	
BUT_01_2017	1	1	0	13	6	0	1	0	11	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	6	0	23	2	0	0	10	0	0	0	
ANJ_01_2018	45	1	0	92	0	0	4	0	0	0	0	20	0	0	0	0	110	1	0	0	0	0	0	0	8	0	1	0	0	0	0	3	0	
ANJ_02_2018	1	3	0	111	0	14	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	165	13	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	0	0	0	0	0	
DRA_01_2018	3	0	0	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	4	0	0	0	0	0	
DRA_02_2018	0	3	0	59	0	0	9	0	2	0	0	18	0	0	0	0	59	44	0	0	0	1	0	2	3	0	7	0	0	0	0	0	0	
TREB_01_2018	48	1	0	33	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	16	25	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	42	0	0	0	0	
TREB_02_2018	15	5	0	61	1	0	1	0	0	0	0	45	0	0	0	0	5	11	0	0	1	0	0	0	3	0	1	0	0	14	0	0	0	
DAG_01_2018	0	0	0	74	1	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	
POST_01_2018	5	0	0	13	2	0	1	0	0	1	1	6	24	0	0	0	11	4	0	0	0	0	0	0	12	9	23	1	0	0	0	0	0	
PAT_01_2019_AMONT	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	30	0	0	0	0	0	0	0	
PAT_02_2019_AVAL	1	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	
CHAM_02_2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	
CHAM_01_2019	0	13	0	13	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
CIR_02_2019	75	1	0	0	4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
CIR_03_2019	2	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	111	2	0	0	0	0	0	0	
CIR_01_2019	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
BUT_01_2019	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CHAPE_01_2019	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	71	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
BEN_01_2019	0	1	0	12	0	16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	27	8	0	7	0	0	0	1	0	0	

Tableau 23 Effectifs log transformés des espèces piscicoles entre 2018 et 2019.

	ABL	ANG	BOU	BRB	BRE	BRO	CAA	CAS	CCO	CHE	GAR	GOU	HOT	IDE	MUP	PCH	PER	PES	PSR	ROT	SPI	TAN	VAI
ANJ_01_2018	1.66275783	0.301029996	1.968482949	0	0	0.69897	0	0	0	1.32221929	2.04532298	0.30103	0	0	0	0	0	0.95424251	0	0.30103	0	0	0.60205999
ANJ_02_2018	0.30103	0.602059991	2.049218023	0	1.17609126	0	0	0	0	1.41497335	2.22010809	1.14612804	0	0	0	0.30103	0.60205999	0.69897	0.95424251	0	0	0.30103	0
DRA_01_2018	0.60205999	0	1.041392685	0	0	0.30103	0	0	0	0	1.95904139	0	0	0	0	0.69897	0	0	0.60205999	0.69897	0	0	0
DRA_02_2018	0	0.602059991	1.77815125	0	0	1	0	0.47712125	0	1.2787536	1.77815125	1.65321251	0	0.30103	0	0.47712125	0.60205999	0	0.90308999	0	0	0	0
TREB_01_2018	1.69019608	0.301029996	1.531478917	0	0	0	0	0	0	1.5797836	1.23044892	1.41497335	0	0	0	0	0.30103	0	0	0	1.63346846	0	0
TREB_02_2018	1.20411998	0.77815125	1.792391689	0.301029996	0	0.30103	0	0	0	1.66275783	0.77815125	1.07918125	0.30103	0	0	0	0.60205999	0	0.30103	0	1.17609126	0	0
DAG_01_2018	0	0	1.875061263	0.301029996	0	0	0	0	0.95424251	0	1.63346846	0.47712125	0	0	0	0.30103	0	0	1.34242268	0	0	0	0
PAT_01_2019_AMONT	0	0.301029996	0	0	0	0	0.30103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.84509804	1.49136169	0	0	0	0
PAT_02_2019_AVAL	0.30103	1.342422681	0	0	0	0	0	0	0	1.30103	0.30103	0	0	0	0.30103	0	0	0.77815125	0.30103	0	0	0	0
CHAM_01_2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0.60205999	0	0	0.30103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5797836
CHAM_02_2019	0	1.146128036	1.146128036	0	0	0	0	0	0.47712125	0.30103	1.41497335	0	0	0	0	0	0	1.32221929	0	0	0	0.30103	0
BUT_01_2019	0	0	0	0	0	0.30103	0	0	0.47712125	0	0	0	0	0	0	0.69897	0	0	0	0	0.30103	0	0

Tableau 24 Classes d'effectifs des macroinvertébrés sur les boires entre 2016 et 2019.

Code Sandre	262	248	211	31	276	223	238	363	456	399	473	22619	58	72	79	734	739	722	725	728
	Brachycentridae	Ecmonidae	Hydropsychidae	Leptoceridae	Limnephilidae	Polycentropodidae	Psychomyiidae	Baetidae	Caenidae	Heptageniidae	Leptophlebiidae	Polymitarcidae	Potamanthidae	Aphelecheiridae	Corixidae	Gerridae	Hydrometridae	Naucoridae	Nepidae	Notonectidae
CELFP1_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAMPF1_16	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1
CHAMSA1_16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAMPF2_16	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
CHAMSA2_16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
CIRPF1_16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	2	0	0	1	1
CIRSA1_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
CIRPF2_16	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	3	1	0	1	0	1
CIRSA2_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0
MAUPF1_16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
MAUSA1_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAUPF2_16	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
MAUSA2_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POSPF1_16	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	3	2	0	1	0	1
POSPF2_16	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	0	0
POSSA2_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SEBPF1_16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEBSA1_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEBPF2_16	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BUTPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BUTPF2_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
BUTSA1_17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CELSA1_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
CELPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CHAPF3_17	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
CHAPF2_17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
CHAPF1_17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CIRPF3_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CIRPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CIRPF2_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
DEFPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
DELFP1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROUPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ROUPF2_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SAVPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SAVSA1_17	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TORPF4_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
TORPF2_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
TORPF1_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TORPF3_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
TORSA3_17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TORSA4_17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ANJ_1_AD_18	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
ANJ_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
ANJ_2_AD_18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANJ_2_AD_18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
BEAU_1_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_2_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEAU_2_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAG_1_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
DAG_1_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
DRA_1_AD_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_PR_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
DRA_1_AD_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRA_1_PR_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
DRA_2_AD_18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
DRA_2_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
TREB_1_AD_18	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
TREB_1_PR_18	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
TREB_2_AD_18	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
TREB_2_PR_18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
VIN_1_AD_CAMP1_18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
VIN_1_PR_CAMP1_18	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
VIN_1_AD_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIN_1_PR_CAMP2_18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
VIN_2_AD_CAMP1_18	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
VIN_2_PR_CAMP1_18	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
VIN_2_AD_CAMP2_18	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
VIN_2_PR_CAMP2_18	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
PAT_1_PR_19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
PAT_1_AD_19	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
PAT_2_PR_19	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
PAT_2_AD_19	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAPE_1_PR_19	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CHAPE_1_AD_19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CHAPE_2_PR_19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CHAPE_2_AD_19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
BEN_1_PR_19	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BEN_1_AD_19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

Analyse statistique du fonctionnement hydroécologique des boires de Loire : mise en relation des facteurs mésologiques et biologiques

732	743	61	527	527	2396	614	614	512	517	63	67	65	571	571	522	598	746	847	819	791	87	796	831	844
Pleidae	Velidae	Dryopidae	Dytiscidae	Dytiscidae. nd	Dytiscinae	Elmidae	Elmidae. nd	Gyrinidae	Haliplidae	Helophoridae	Hydraenidae	Hydrochidae	Hydrophilidae	Hydrophilidae. nd	Hygrobiidae	Limnoidae	DIPYTERES	Anthomyidae	Ceratopogonidae	Chaoboridae	Chironomidae	Culicidae	Empididae	Ephyridae
0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0
0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								

Analyse statistique du fonctionnement hydroécologique des boires de Loire : mise en relation des facteurs mésologiques et biologiques

Limoniidae	Psychodidae	Sciomyzidae	Simuliidae	Stratiomyidae	Tabanidae	Aeshnidae	Coenagrionidae	Coenagrionidae, nd	Corduliidae	Gomphidae	Lestidae	Libellulidae	Platycnemididae	Sialidae	Syrphidae	Gammaridae	Aesellidae	DECAPODES	Astacidae	Astacidae, nd	Athyidae	Cambaridae	Cambaridae, nd	Corophiidae	Dreissenidae
0	0	1	3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	0	1	1	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0			

Analyse statistique du fonctionnement hydroécologique des boires de Loire : mise en relation des facteurs mésologiques et biologiques

[illegible]



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Analyse statistique du fonctionnement
hydroécologique des boires de Loire : Mise en relation des
facteurs mésologiques et biologiques.

Alice GRELL

2019-2020

Résumé :

Les espèces aquatiques présentes au sein des boires sont soumises à de multiples menaces d'origine naturelles ou anthropiques comme les étiages sévères, les espèces envahissantes ou le comblement du milieu.

Dans l'optique de restaurer le fonctionnement naturel des boires de la Loire entre Nantes et Angers, le conservatoire des espaces naturels des pays de la Loire souhaite établir un suivi des peuplements de macroinvertébrés et de poissons. Aussi dans le cadre du Contrat pour la Loire et ses annexes s'étalant de 2015 à 2021, la SARL RIVE a pour mission de mener un suivi afin d'établir un état initial avant travaux.

Le but de ce stage a donc été de rechercher et d'appliquer des traitements statistiques, permettant d'identifier et de hiérarchiser les facteurs issus du milieu expliquant au mieux la structure des peuplements aquatiques. Cette identification permettra par la suite d'orienter des projets de restauration adaptés.

À la suite d'un traitement statistique multivariée, il apparaît donc que d'un point de vue habitationnel, le substrat retrouvé en surface semblent être certes, le facteur le plus influençant, mais il n'explique pas en totalité le cortège faunistique des boires.

Mots Clés : Boires, Analyses multivariées, Peuplements aquatiques, Facteurs
mésologiques, Suivi, Habitat

SARL RIVE

Agence Centre – Val de Loire

11 Quai Danton 37500 CHINON

Tuteur entreprise :

Michel BACCHI

Cogérant de la SARL RIVE

Tuteur académique :

Pierre PEETERS