



HAL
open science

Effets des paramètres physiques locaux dans les habitats aquatiques littoraux du lac de Lacanau (Gironde) sur la distribution et les assemblages de macrophytes

E. Boudier

► **To cite this version:**

E. Boudier. Effets des paramètres physiques locaux dans les habitats aquatiques littoraux du lac de Lacanau (Gironde) sur la distribution et les assemblages de macrophytes. Sciences de l'environnement. 2016. hal-02604892

HAL Id: hal-02604892

<https://hal.inrae.fr/hal-02604892v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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



Stage
3^{ème} année d'Ecole d'Ingénieurs
2015/2016

Effets des paramètres physiques locaux dans les habitats aquatiques littoraux du lac de Lacanau (Gironde) sur la distribution et les assemblages de macrophytes



Etudiante : Elise BOUDIER
Encadrant entreprise : Vincent BERTRIN



Spécialité : Eau et Environnement

REMERCIEMENTS

Les travaux écrits dans le présent rapport ont été réalisés au centre Irstea de Bordeaux, au sein de l'équipe CARMA de l'unité de recherche EABX.

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage, M. Vincent Bertrin, pour m'avoir encadrée et accompagnée tout au long de ces six mois de stage. Un grand merci également aux membres de l'équipe CARMA pour leur accueil et leurs conseils avisés.

Je souhaite remercier mon professeur, M. Philippe Chazal, pour m'avoir suivie et conseillée au cours de ce stage ainsi qu'au cours de ces trois années passées à étudier à l'ENSIL.

Merci à la team des stagiaires de l'Irstea pour leur bonne humeur quotidienne et leur soutien. Je leur souhaite à tous de grandes réussites professionnelles et personnelles.

Merci à Julie, Constant et Brice pour m'avoir fait partager leur joie de vivre et sans qui ces six mois à Bordeaux n'auraient pas été les mêmes.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
I. Eléments de contexte.....	3
1.1. Le lac de Lacanau.....	3
1.2. Les macrophytes.....	4
1.3. Morphologie des berges et hydrodynamique.....	5
1.3.1. La concentration en matière organique dans les sédiments.....	5
1.3.2. La granulométrie des sédiments	5
1.3.3. La pente à proximité des berges	6
1.3.4. L'exposition au vent et aux vagues	6
1.3.5. La remise en suspension des sédiments.....	6
II. Méthodes	7
2.1. Les outils informatiques utilisés	7
2.1.1. Les systèmes d'information géographique.....	7
2.1.2. Le langage de programmation R	7
2.2. Stations et classes de profondeur.....	7
2.3. Constitution des bases de données	9
2.3.1. Mesures et calculs des paramètres physiques locaux étudiés.....	9
2.3.2. Méthode des relevés floristiques	11
2.4. Etude de la base de données environnementales	11
2.4.1. Profils des données environnementales.....	11
2.4.2. Les relations de corrélations	11
2.4.3. Classification Ascendante Hiérarchique.....	12
2.4.4. Analyse en Composantes Principales	13
2.4.5. Relations de corrélations entre la classification et les données environnementales ..	13
2.4.6. Méthode CART : arbre de régression.....	13
2.5. Relations entre la base de données environnementale et la base de données floristique	14
2.5.1. Analyse Factorielle des Correspondances	14
2.5.2. Espèces indicatrices : méthode IndVal.....	14
2.5.3. Analyse Canonique des Correspondances.....	15
III. Résultats	16
3.1. Etude de la base de données environnementales	16
3.1.1. Profils des données environnementales.....	16
3.1.2. Relations de corrélations	17
3.1.3. Classification Ascendante Hiérarchique.....	18

3.1.4.	Analyse en Composantes Principales	19
3.1.5.	Corrélations classification-environnement	20
3.1.6.	Méthode CART : arbre de régression.....	21
3.2.	Relations entre plantes et environnement.....	22
3.2.1.	Analyse Factorielle des Correspondances	22
3.2.2.	Espèces indicatrices : méthode IndVal.....	24
3.2.3.	Analyse Canonique des Correspondances.....	24
IV.	Discussion	26
4.1.	Interprétation des résultats.....	26
4.2.	Possibilités d'évolution de la méthode	28
	CONCLUSION.....	30

Liste des figures

Figure 1: Localisation du lac de Lacanau en France sur le littoral aquitain.....	4
Figure 2: Contour du lac de Lacanau avec les positions et numéros d'identification des 25 stations étudiées.....	8
Figure 3: Schémas de deux stations vues du dessus, (a) cas théorique en présence de pentes homogènes, (b) cas particulier en présence de pentes hétérogènes.....	9
Figure 4 : Positions géographiques des classes de profondeur sur le lac de Lacanau, coloriées selon les résultats de la CAH.....	19
Figure 5 : Analyse en composantes principales.....	20
Figure 6 : Arbre de régression.....	22
Figure 7 : Analyse factorielles des correspondances.....	23
Figure 8 : Analyse canonique des correspondances.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau des valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales, écarts-types et erreurs standards des variables environnementales étudiées.....	16
Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées.....	17
Tableau 3: Tableau des coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées et les résultats de la CAH.....	21

Liste des abréviations

ACC : Analyse Canonique des Correspondances
ACP : Analyse en Composantes Principales
AFC : Analyse Factorielle des Correspondances
CAH : Classification Ascendante Hiérarchique
CARMA : Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques
CART : Classification And Regression Trees
CRAN : the Comprehensive R Archive Network
EABX : écosystèmes aquatiques et changements globaux
Esri : Environmental Systems Research Institute
IndVal : Indicator Value
Irstea : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
Keddy : indice d'exposition au vent et aux vagues
MO : fraction de Matière Organique dans les sédiments
ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
RES : Remise en Suspension des Sédiments
SIG : Système d'Information Géographique

INTRODUCTION

La Directive 92/43 «Habitat-Faune-Flore» et la Directive 2000/60 «Eau» reconnaissent l'importance patrimoniale, bio-indicatrice et fonctionnelle des macrophytes. Elles mettent en place des dispositions à l'échelle européenne, nationale et régionale dans le but d'améliorer la protection et la conservation des sites où des espèces patrimoniales rares sont présentes et d'atteindre le «bon état écologique» pour toutes les masses d'eau. Ces dispositions peuvent impliquer soit l'absence d'action lorsque ces sites témoignent d'une stabilité et d'une forte biodiversité, soit des opérations d'aménagement ou de changement de l'état des écosystèmes lorsqu'ils sont menacés (Haury, Dutartre, et Peltre 2008, 125-33). Les plantes aquatiques peuvent également faire l'objet d'opérations de contrôle et de gestion lorsque leur développement devient rapide et important à l'échelle d'un site, cela peut être le cas d'espèces indigènes dont la modification de certains paramètres environnementaux accélère leur dynamique de colonisation, ou d'espèces exotiques envahissantes.

Depuis les années 1980, plusieurs espèces de macrophytes exotiques créent des envahissements dans les lacs et étangs du littoral aquitain, notamment *Lagarosiphon major*, *Egeria densa* et de *Ludwigia spp* («S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux» 2004). La prolifération de plantes invasives dans un plan d'eau influe sur l'équilibre du milieu, notamment en ralentissant le développement des espèces indigènes. Ces plantes ont également des conséquences sur l'écoulement des eaux et nuisent à la pratique des activités de baignade, de nautisme et de pêche (Haury, Dutartre, et Peltre 2008, 9-22). La présence de ces espèces en France est due à leur usage en aquariophilie, leur vente en jardineries et au transport de boutures dans le cadre d'activités de loisirs telles que le nautisme («S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux» 2004; «Les Plantes Invasives - Ville de Lacanau» 2016).

Les opérations de gestion, qu'elles visent la conservation des espèces patrimoniales et/ou le contrôle des espèces invasives, nécessitent donc en premier lieu la connaissance de l'état des populations et des communautés, ainsi que des facteurs influençant la distribution et les assemblages d'espèces.

Nous nous intéressons dans cette étude à l'influence de l'hydrodynamique et de la morphologie des berges sur la végétation aquatique des zones littorales du lac de Lacanau. Cette analyse croisée de variables environnementales et biologiques a pour but d'identifier le rôle des paramètres physiques pertinents sur la structure des communautés végétales et leur distribution à différentes échelles du lac. Il s'agit donc dans un premier temps de caractériser les différents biotopes physiques littoraux présents, puis d'identifier les types de communautés végétales qui les colonisent. Il s'agit ensuite d'analyser les relations statistiques entre les variables physiques, la structure et la distribution de ces communautés.

L'Irstea (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, anciennement appelé Cemagref) est un établissement public à caractère scientifique et technologique tourné vers la recherche environnementale, il est réparti en France dans neuf centres («IRSTEa | Irstea» 2016). Le centre Irstea de Bordeaux travaille sur des enjeux concernant la dynamique des écosystèmes aquatiques, l'environnement et les dynamiques territoriales, et la gestion patrimoniale des réseaux d'eau («Bordeaux | Irstea» 2016). Cette étude a été menée au sein de l'équipe CARMA (Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques) de l'unité de recherche EABX (Ecosystèmes aquatiques et changements globaux) dont les travaux visent à

INTRODUCTION

caractériser le fonctionnement et les réponses des écosystèmes aquatiques sous l'influence de diverses catégories d'altérations anthropiques en cours d'eau et plans d'eau (« Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques | Irstea » 2016).

I. Eléments de contexte

1.1. Le lac de Lacanau

Le littoral aquitain (ou Côte d'Argent) dans le sud-ouest de la France mesure 240 km de long et s'étend de l'estuaire de la Gironde au nord jusqu'à l'estuaire de l'Adour au sud, il bénéficie d'un climat tempéré de type océanique. Il est bordé de plages de sable fin et de dunes de sable formées par l'action du vent, l'élévation du niveau de la mer et l'érosion côtière à l'Holocène (ère géologique représentant les 10 000 dernières années) (Aubié et Tastet 2000; Tastet et Pontee 1998). La formation de ces dunes est à l'origine des plans d'eau aquitains : les estuaires des fleuves côtiers ont été obstrués, entraînant ainsi l'accumulation des eaux derrière les dunes côtières (Dutartre 1986).

Les différentes études menées jusqu'à présent sur la végétation aquatique des lacs aquitains ont révélé la présence de plusieurs espèces végétales dites « patrimoniales » car rares et protégées. Il s'agit par exemple de *Littorella uniflora* et *Lobelia dortmanna*. Cette dernière colonise majoritairement les lacs du nord-ouest de l'Europe, les lacs aquitains représentant la limite méridionale de la distribution de cette espèce sur le continent. D'autres sont endémiques à ces lacs, telles que *Caropsis verticillatunundata* et *Isoetes boryana*. Les lacs et étangs du littoral aquitain sont également le lieu de colonisation par des espèces végétales exotiques à caractère envahissant telles que *Lagarosiphon major*, *Egeria densa*, *Ludwigia peploïdes*, *Myriophyllum aquaticum*, etc. (Clement et Aidoud 2009; Berghen 1968; Bertrin et al. 2012). Des photos de *Littorella uniflora*, *Lobelia dortmanna*, *Caropsis verticillatunundata*, *Ludwigia peploïdes*, *Egeria densa* et *Lagarosiphon major* se trouvent dans l'Annexe 1.

Les lacs aquitains se ressemblent donc de par leur origine, leur fonctionnement écologique et des espèces végétales qu'ils abritent. Notre étude est centrée sur le lac de Lacanau que nous prenons comme modèle, mais la volonté de connaître l'influence de l'hydromorphodynamique sur la végétation aquatique littorale s'étend aux autres lacs aquitains.

Le lac de Lacanau se situe dans le département de la Gironde en région Nouvelle Aquitaine (France), la localisation de ce lac en France est indiquée sur la Figure 1. Ce lac a un profil dissymétrique : la profondeur augmente progressivement d'est en ouest, avec des pentes douces sur les rives est suivant celles du plateau landais et des pentes fortes sur les rives ouest au pied des dunes (Bertrin et al. 2013). Ce profil est similaire à celui des autres lacs de la région.

Il possède une superficie totale de 20 km² avec une profondeur moyenne de 2,6 m et une profondeur maximale de 8 m. Son volume moyen est de 53 millions de m³ avec un volume annuel entrant de 124 millions de m³ et un taux de renouvellement des eaux de 2,34 (l'eau du lac est donc renouvelée plus de deux fois en une année). Ce lac draine un bassin versant d'une superficie de 285 km² et reçoit les eaux du lac de Carcans-Hourtin au nord par le canal des Etangs, les eaux s'écoulent ensuite vers le Bassin d'Arcachon au sud également par le canal des Etangs (« S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux » 2004).

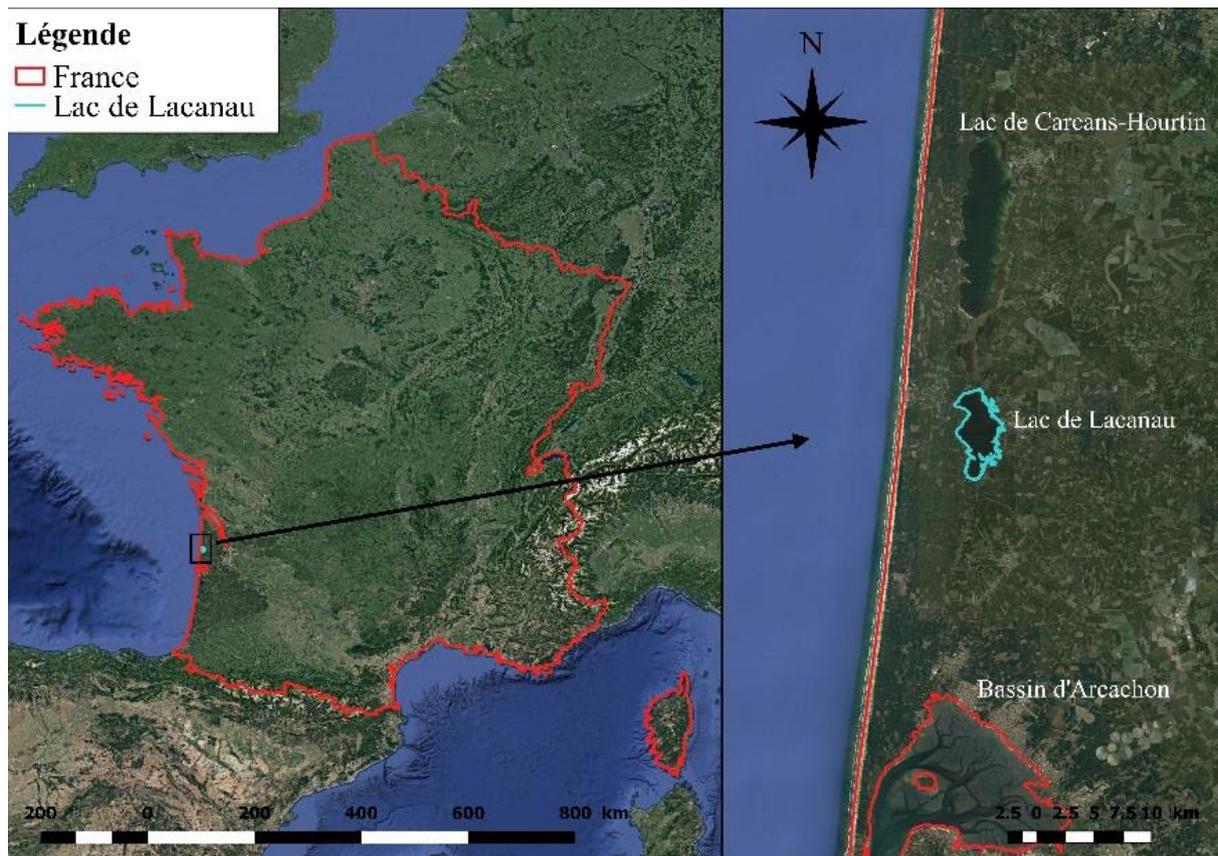


Figure 1: Localisation du lac de Lacanau en France sur le littoral aquitain

Ce lac fait l'objet de diverses activités de loisirs telles que la navigation en bateau, les sports nautiques, la chasse et la pêche (« S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux » 2004).

Le niveau trophique du lac de Lacanau est mésotrophe (« S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux » 2004), ce qui signifie que la disponibilité en éléments nutritifs est moyenne et que la production de matière végétale est modérée.

1.2. Les macrophytes

Les macrophytes sont les végétaux aquatiques visibles à l'œil nu, ils appartiennent pour la plupart aux trois types biologiques suivants :

- les hydrophytes qui développent leur appareil végétatif et les bourgeons dormants dans l'eau ou à la surface de l'eau, ces plantes peuvent être enracinées ou flotter librement ;
- les hélophytes qui développent leur appareil végétatif au-dessus de l'eau et les bourgeons dormants sous l'eau ;
- les amphiphytes, type biologique intermédiaire entre les hydrophytes et les hélophytes, qui peuvent se développer aussi bien dans la zone palustre terrestre que dans l'eau.

Les macrophytes ont donc la capacité de se développer dans différents types d'écosystèmes aquatiques (lenticues et lotiques), où ils sont à la fois indicateurs et ingénieurs des processus écologiques (Cellamare 2009). En effet, d'une part leur distribution est liée aux variables physiques locales ainsi qu'aux propriétés chimiques de l'eau, et d'autre part leurs rôles clés dans des phénomènes

I. Eléments de contexte

physiques (protection contre l'érosion, stabilisation des sédiments...) et dans des cycles biochimiques (photosynthèse, production de biomasse...) leur permettent d'intervenir sur les conditions environnementales (Haury, Dutartre, et Peltre 2008, 51-62, 79-90; Cellamare 2009; Bornette et Puijalon 2010). De plus, les traits des végétaux aquatiques varient en fonction des propriétés du milieu colonisés, et peuvent également présenter des adaptations à des contraintes ou des variations physico-chimiques, ces changements peuvent être de nature physiologie ou biologique. Leur plasticité biologique leur permet notamment de répondre à des contraintes de nature hydraulique ou trophique.

Les espèces macrophytiques ne sont pas indépendantes les unes des autres, elles forment des communautés végétales qui varient selon les paramètres des milieux aquatiques qu'ils occupent (Haury, Dutartre, et Peltre 2008, 37-50).

Leur fort pouvoir d'adaptation aux différents milieux aquatiques confère alors aux macrophytes un intérêt en ce qui concerne la caractérisation de l'état écologique d'un milieu.

1.3. Morphologie des berges et hydrodynamique

La croissance et la distribution des macrophytes sont influencées par les interactions avec des variables environnementales (Madsen et al. 2001). Nous cherchons à mettre en évidence les relations entre les macrophytes et l'hydromorphodynamique sur des zones littorales du lac de Lacanau. La profondeur des zones étudiées va jusqu'à 1 m de profondeur, cette zone littorale présentant généralement la plus forte diversité de macrophytes (Chauvin et al. 2014). Testard (1995) associe la présence de nombreux macrophytes dans les espaces littoraux lacustres peu profonds à leur forte capacité de production de biomasse, leur permettant ainsi d'intervenir dans l'évolution de la géomorphologie des milieux qu'ils occupent. Neuf variables ont été retenues dans cette étude car jugées pertinentes dans le contexte du fonctionnement des biotopes physiques littoraux des lacs aquitains : la concentration en matière organique dans les sédiments, la granulométrie des sédiments (étudiée à cinq tailles de grain), la pente à proximité des berges, l'exposition au vent et aux vagues et la remise en suspension des sédiments.

1.3.1. La concentration en matière organique dans les sédiments

La matière organique (MO, exprimée en pourcentage) est l'une des variables les plus importantes expliquant la distribution des macrophytes (Chappuis, Gacia, et Ballesteros 2014). La composition des sédiments a une grande influence sur la croissance des macrophytes. En effet, une quantité trop importante ou insuffisante de matière organique dans les sédiments peut inhiber la croissance des macrophytes (J. W. Barko et Smart 1983; John W. Barko, Gunnison, et Carpenter 1991; Madsen et al. 2001).

1.3.2. La granulométrie des sédiments

En plus de fournir une source de nutriments aux macrophytes, les sédiments servent aussi de base pour une attache physique par le biais des racines (John W. Barko, Gunnison, et Carpenter 1991). Clarke et Wharton (2001) soulèvent la possibilité que la granulométrie et les concentrations en nutriments des sédiments varient selon les espèces de macrophytes associées, et montrent que les caractéristiques des sédiments sont fortement variables.

1.3.3. La pente à proximité des berges

Les variations de pentes ont d'une part un effet sur l'action des vagues sur le littoral, et d'autre part sur les caractéristiques physiques des sédiments. Une pente douce permet le dépôt de particules fines tandis qu'une pente raide est le lieu d'érosion et de transport de sédiments, la différence entre une pente raide et une pente douce réside donc entre autres dans la stabilité physique des sédiments (Duarte et Kalff 1986). Duarte et Kalff (1986) ont été les premiers à quantifier la relation entre la pente et la biomasse des macrophytes submergés : cette étude quantifie l'influence de la pente du littoral sur les communautés de macrophytes submergés, et l'existence d'un point de rupture de pente en-dessous et au-dessus duquel la relation entre les caractéristiques des sédiments et la biomasse change.

1.3.4. L'exposition au vent et aux vagues

Les mouvements de l'eau sont reconnus en tant que facteurs influençant la croissance et la distribution des macrophytes submergés : des courants faibles peuvent accroître la croissance des macrophytes en améliorant l'apport de CO₂ et de nutriments, mais des courants trop forts la restreignent en induisant un stress mécanique et en perturbant les processus métaboliques et d'absorption tels que la photosynthèse (Madsen et al. 2001). Strand et Weisner (1996) montrent que la biomasse des hydrophytes augmente avec l'exposition aux vagues jusqu'à un certain seuil où la végétation aquatique submergée disparaît de manière plus ou moins brusque lorsqu'elle est fortement exposée aux vagues.

1.3.5. La remise en suspension des sédiments

Le processus de remise en suspension des sédiments (RES) contribue à l'atténuation de la lumière par l'augmentation de la turbidité, à la libération de nutriments utiles à la croissance des macrophytes et évite l'accumulation de matière organique. Ce processus influence donc la croissance des macrophytes, mais peut également être réduit par la réduction de l'intensité des vagues et la redirection des courants induits par la croissance des macrophytes (Madsen et al. 2001).

II. Méthodes

Il s'agit dans un premier temps de compléter et de mettre en forme la base de données environnementale et de mettre en évidence les éventuelles relations de corrélations entre les différents paramètres. Une classification de la répartition de ces paramètres physiques sur des zones littorales du lac est également réalisée afin d'identifier différents types de biotopes physiques. Dans un second temps, il est nécessaire d'étudier les relevés floristiques qui ont été effectués durant les étés des années 2013 et 2014 sur le littoral du lac de Lacanau. Finalement, nous mettons en relation les données environnementales et les données floristiques afin de mettre en exergue les relations plantes-environnement.

2.1. Les outils informatiques utilisés

Nous étudions l'hydromorphodynamique des zones littorales du lac de Lacanau et son influence sur la végétation aquatique en termes de distribution et de structures des communautés de macrophytes. Afin de calculer certains paramètres physiques (indice d'exposition aux vents et remise en suspension des sédiments) et de mener à bien des analyses statistiques de données, nous avons utilisé les outils informatiques suivants.

2.1.1. Les systèmes d'information géographique

Les SIG (Systèmes d'Information Géographique) sont des systèmes informatiques permettant d'analyser et de représenter des données localisées dans l'espace. Pour répondre à nos besoins, nous utilisons les systèmes QGIS Desktop 2.14.1 (logiciel libre) et ArcGIS Desktop 10.2 développé par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). (« SIG : Tout savoir sur les Systèmes d'Information Géographique | Esri France » 2016; « fiche-tic-pgb-sig.pdf - fiche-tic-pgb-sig.pdf » 2016; « Découvrez QGIS » 2016; « ArcGIS » 2016)

2.1.2. Le langage de programmation R

R est un langage de programmation et un logiciel libre permettant de réaliser du traitement de données, des analyses statistiques et des graphiques. La bibliothèque initiale de R est extensible grâce aux « packages » (ou paquets, extensions) mis librement à disposition sur le CRAN (the Comprehensive R Archive Network), les fonctions et paquets utilisés sont développés dans la partie « Méthodes » (cf. § II, p. 7) de ce rapport. (« R: The R Project for Statistical Computing » 2016; « R (langage de programmation et environnement statistique) » 2016; « The Comprehensive R Archive Network » 2016)

2.2. Stations et classes de profondeur

Notre étude porte sur la végétation aquatique des rives du lac de Lacanau, pour cela nous avons étudié des stations d'étude situées dans la zone littorale du lac. Les dimensions de ces stations sont variables en fonction de la pente et de la profondeur. Elles suivent un linéaire des rives compris entre 30 m et 75 m, et se terminent vers le large à une profondeur égale à 1 m (inclus). Selon l'orientation des rives, les stations se limitent au large à une distance de la berge ne dépassant pas quelques dizaines de mètres à l'ouest du lac (pentes fortes) pour atteindre plusieurs centaines de mètres à l'est (pentes

II. Méthodes

douces). Elles sont distribuées sur le lac à l'aide des relevés floristiques disponibles (Berghen 1968; Clement et Aidoud 2009; Bertrin et al. 2012) de manière à positionner ces stations dans les secteurs du lac où l'évolution de la végétation aquatique est jugée stable et représentative de la situation générale du lac. Des stations ont également été positionnées au niveau des sites colonisés par des espèces exotiques à caractère envahissant. Les stations portent les numéros des sites ayant fait l'objet de relevés floristiques par le passé. Ces 25 stations sont réparties autour du lac comme indiqué sur la Figure 2.

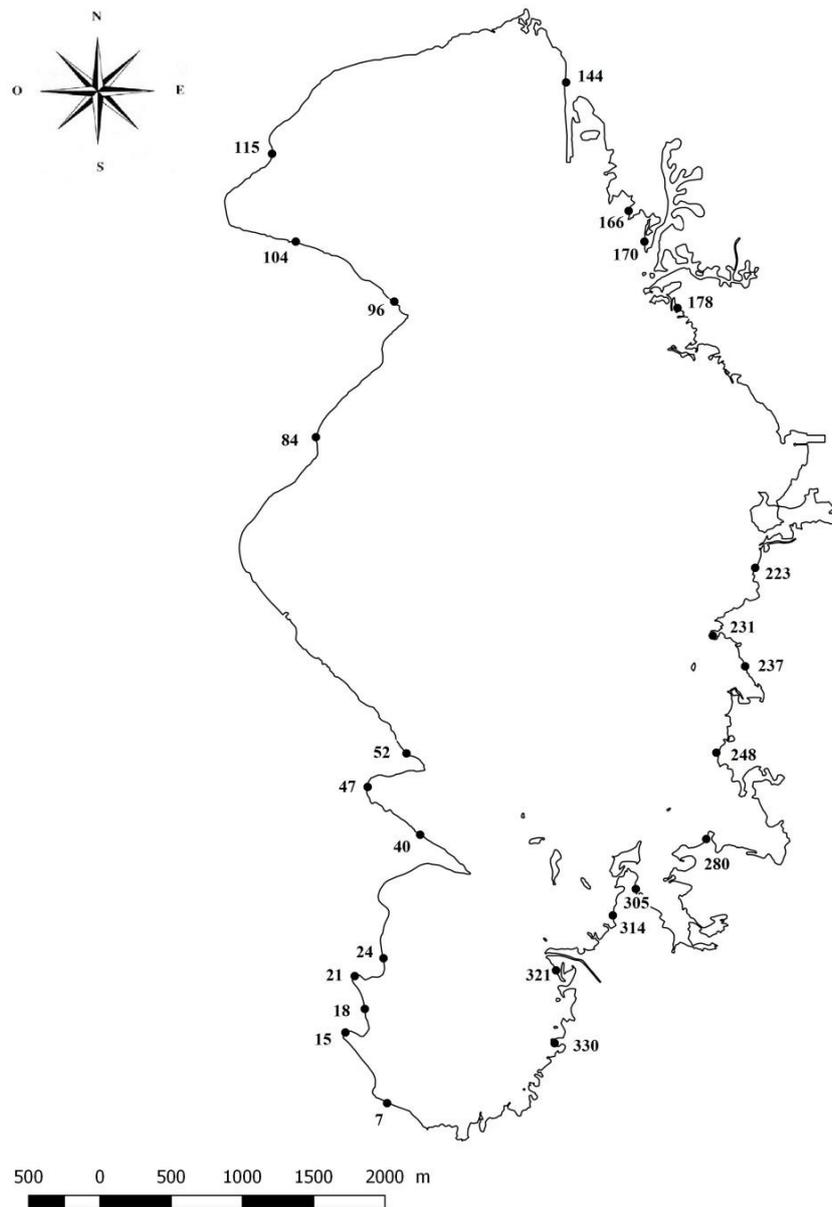
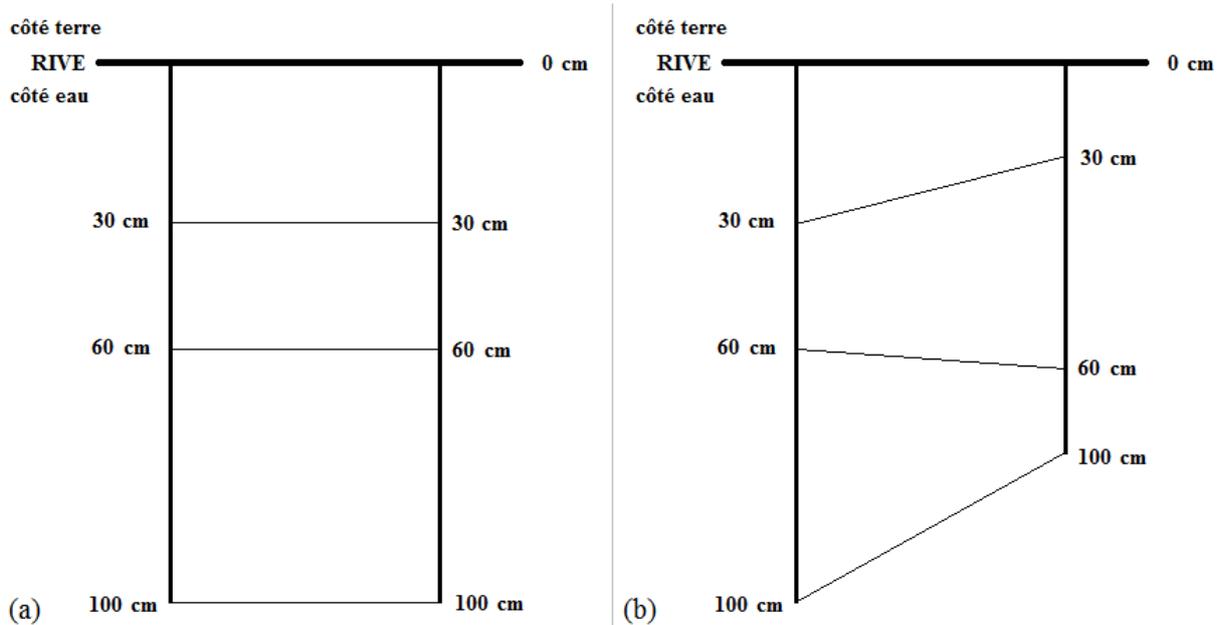


Figure 2: Contour du lac de Lacanau avec les positions et numéros d'identification des 25 stations étudiées

Pour chacune de ces stations nous avons étudié trois classes de profondeur : de 0 à 30 cm, de 30 à 60 cm et de 60 à 100 cm de profondeur. Les coordonnées géographiques des limites des stations ont été enregistrées. La Figure 3 est un schéma représentant deux stations vues du dessus avec la disposition des trois classes de profondeur.

II. Méthodes



2.3. Constitution des bases de données

Les mesures ou les calculs ont été effectués pour chaque classe de profondeur de chaque station étudiée. Nous avons créé la base de données environnementale en assemblant ces paramètres : les noms des lignes correspondent aux identifiants comprenant la classe de profondeur et le numéro de secteur de rive (70 individus), et les noms de colonnes sont les paramètres physiques étudiés (9 paramètres).

2.3.1. Mesures et calculs des paramètres physiques locaux étudiés

La concentration en matière organique dans les sédiments et la granulométrie des sédiments ont été mesurées en laboratoire par Vincent Bertrin à l'issue des prélèvements effectués sur le terrain. Les paramètres ayant fait l'objet d'un calcul ou d'une modélisation au cours de cette étude sont la pente, l'exposition au vent et aux vagues et la remise en suspension des sédiments.

2.3.1.1. La concentration en matière organique dans les sédiments

La fraction de matière organique dans les sédiments a été mesurée en laboratoire par la méthode de la perte au feu. Un échantillon de sédiments est prélevé en triplicats à l'aide d'un carottier sur les cinq premiers centimètres du sol. Les triplicats sont ensuite mélangés et homogénéisés. Un volume constant de sédiments (5 cm^3) est ensuite prélevé en triplicats dans ce mélange. Chaque triplicat est pesé pour obtenir le poids humide, puis passé à l'étuve à 70°C pendant 24 heures et pesé à nouveau pour obtenir le poids sec. Enfin, les triplicats sont calcinés dans un four à moufle à 550°C durant 3 heures, puis pesés pour obtenir le poids sans matière organique. La différence de masse de l'échantillon avant et après calcination permet de calculer la fraction organique qui sera exprimée en pourcentage.

II. Méthodes

2.3.1.2. La granulométrie

La granulométrie des sédiments a été mesurée en laboratoire par tamisage et perte au feu. Un échantillon de sédiments est prélevé en triplicat à l'aide d'un carottier sur les 15 premiers centimètres du sol. Les triplicats sont ensuite mélangés et homogénéisés, puis tamisés durant 10 minutes à l'aide d'une tamiseuse de laboratoire à travers un dégrilleur afin d'éliminer les débris organiques grossiers, et cinq tamis distribués verticalement ainsi : 1mm, 0,5 mm, 0,2 mm, 0,063 mm et 0,005 mm. Une tare est effectuée sur chaque tamis avant tamisage. Après tamisage, chaque tamis contenant du sédiment est séché durant 24 heures à 70°C, puis pesé. Un sous-échantillon des sédiments contenus dans chaque tamis est ensuite prélevé en triplicat puis traité à l'aide de la méthode de la perte au feu (3 heures à 550°C) pour obtenir la fraction de la matière organique (cf § 2.3.1.1, p. 9). La masse de cette fraction de matière organique est soustraite à la masse totale des sédiments dans chaque tamis afin d'obtenir uniquement le poids de la fraction minérale des sédiments. Enfin, la part des sédiments contenus dans chaque tamis est calculée à partir du poids total de l'échantillon initial sec et exprimée en pourcentage.

2.3.1.3. La pente

La pente (exprimée en degrés) a été calculée à l'aide du logiciel tableur Microsoft Excel à partir des données relevées sur le terrain sur chaque classe de profondeur de chaque station. Elle a été calculée à partir de la distance moyenne à parcourir entre les isobathes délimitant la classe de profondeur et de la différence de profondeur entre ces isobathes.

2.3.1.4. L'exposition au vent et aux vagues

Ce paramètre a été calculé sur la base des travaux réalisés par (Keddy 1982). Ce dernier propose un indice d'exposition aux vents et aux vagues (ou indice de Keddy, noté Keddy dans les tableaux de résultats) représentant l'effet total des vagues sur la végétation des rives d'un lac. Cet indice permet donc de distinguer les sites les plus exposés aux vents et les plus abrités. Il dépend du fetch (distance d'eau libre sur laquelle le vent souffle sans rencontrer d'obstacle à partir d'un point et d'une direction choisis), de l'occurrence et de la vitesse moyenne du vent selon plusieurs directions. Il a été calculé à partir de ces données pour chaque classe de profondeur de chaque secteur de rive selon la formule (1), issue de (Keddy 1982).

$$I_e = \sum_i^n F_i \times Occ_i \times V_{moy_i} \quad (1)$$

Avec I_e l'indice de Keddy, i la direction pour laquelle le vent souffle, F le fetch, Occ l'occurrence et V_{moy} la vitesse moyenne du vent.

Le fetch est exprimé en km, la vitesse moyenne du vent est exprimée en $km.h^{-1}$ et l'occurrence n'a pas d'unité. L'objectif étant de calculer une mesure liée à l'ampleur de l'énergie des vagues arrivant sur un rivage, intégrée sur une période de temps donnée, ces unités ne sont pas pertinentes. Les valeurs calculées sont donc considérées comme des mesures sans dimension (Keddy 1982; La Peyre et al. 2014).

Le calcul de cet indice a été réalisé à partir d'un script écrit avec le langage de programmation R et du logiciel d'information géographique QGIS, selon une méthode définie dans une étude précédente.

II. Méthodes

2.3.1.5. *La remise en suspension des sédiments*

La remise en suspension des sédiments est la probabilité (exprimée en pourcentage) que les sédiments soient remis en suspension sur la période étudiée. Elle a été calculée selon la méthode et le modèle « Wave model » développés par Rohweder et al. (2012) avec le logiciel d'information géographique ArcGIS. Ce modèle permet de calculer des caractéristiques physiques des vagues telles que la hauteur, la longueur, la période de pointe, la vitesse orbitale maximale, la contrainte de cisaillement et la probabilité de remise en suspension des sédiments. Il utilise les données de fetch, de directions et de vitesses du vent et de la bathymétrie dans des algorithmes issus de USACE (2002) et USACE (1984).

2.3.2. *Méthode des relevés floristiques*

Nous étudions la répartition des espèces de plantes aquatiques sur les rives du lac de Lacanau, pour cela nous nous sommes basés sur les pourcentages de recouvrement (ou abondances) des espèces. Un relevé exhaustif de la végétation a été effectué pour chaque classe de profondeur durant les périodes estivales des années 2013 et 2014. Pour chaque taxon observé, un pourcentage de recouvrement a été estimé. Les plantes observées ont été déterminées à l'espèce, parfois au genre lorsque tous les éléments pour leur identification à l'espèce (fleurs, graines, gamétanges, etc.) n'étaient pas présents.

2.4. Etude de la base de données environnementales

2.4.1. *Profils des données environnementales*

Nous avons étudié les profils des données environnementales en créant des boîtes à moustaches (boxplots) pour chaque variable environnementale représentant les valeurs obtenues pour chaque secteur de rives étudié selon les trois classes de profondeur. Cette représentation nous donne une vue d'ensemble de l'intensité des paramètres physiques selon leur position géographique sur la rive du lac. Nous avons créé les boîtes à moustaches avec la fonction *boxplot* du paquet *{graphics}* (« R: The R Graphics Package » 2016). Nous avons également calculé les valeurs de moyenne, médiane, minimale, maximale, écart-type et erreur standard pour chaque variable en utilisant respectivement la fonction *mean* du paquet *{base}*, la fonction *median* du paquet *{stats}*, les fonctions *min* et *max* du paquet *{base}* et la fonction *sd* du paquet *{stats}* (« R: The R Base Package » 2016; « R: The R Stats Package » 2016).

2.4.2. *Les relations de corrélations*

Nous voulons mettre en évidence les éventuelles relations de corrélations entre les variables environnementales étudiées. Nous avons utilisé le coefficient de corrélation de rang de Spearman ρ qui est une mesure statistique non paramétrique de l'intensité et de la direction d'une relation non-linéaire monotone entre deux variables (Xiao et al. 2015). Le calcul de ce coefficient ne nécessite pas de faire des hypothèses sur la fréquence de distribution ou d'une relation linéaire entre les variables, le rendant populaire et facile d'utilisation. Ce coefficient est compris entre -1 et 1, le sens de la relation est indiqué par le signe et son intensité par la valeur absolue. Nous l'avons calculé à l'aide du langage de

II. Méthodes

programmation R, avec la fonction *rcorr* du paquet *{Hmisc}* (Jr et others 2016) qui utilise l'équation (2).

$$\rho(y_1, y_2) = 1 - \frac{6 \times \sum_i^n (y_{i1} - y_{i2})^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

Avec $\rho(y_1, y_2)$ le coefficient de corrélation de rang de Spearman entre le paramètre physique y_1 et le paramètre physique y_2 , et n le nombre de stations.

La fonction utilisée pour calculer ce coefficient nous permet également d'obtenir la valeur-p associée : il s'agit de la probabilité d'obtenir le résultat observé si l'hypothèse nulle (pas de relation entre les deux variables) est vraie. Si cette probabilité est inférieure à un seuil α (nous l'avons fixé dans cette étude à 0,01), on considère que le risque d'erreur est faible et que le coefficient de corrélation calculé est significatif.

2.4.3. Classification Ascendante Hiérarchique

Nous cherchons à étudier la morphologie des berges en distinguant les stations ayant la même structure du point de vue des variables environnementales étudiées. Une classification permet de définir des groupes homogènes dans un ensemble de données, nous avons réalisé ici une classification ascendante hiérarchique (CAH) à partir des données environnementales, les étapes de sa réalisation sur les données étudiées sont détaillées ci-après. Le principe de la CAH est de rassembler des individus au sein d'un même groupe de manière à ce qu'ils soient le plus semblables possibles, tandis que les groupes sont le plus dissemblables possibles (« Classification ascendante hiérarchique (CAH) » 2016). Les similarités entre individus ont été calculées à partir d'une matrice des distances entre les individus pris deux à deux. Les distances ont été calculées à partir des variables sur lesquelles se basent l'analyse : plus la distance est importante, plus les individus sont dissemblables. Nous détaillons ci-après les étapes de la CAH ainsi que les méthodes de calculs utilisées.

Premièrement, le tableau de données a été normalisé avec la formule *scale* du paquet *{base}* (« R: The R Base Package » 2016) qui permet de normaliser les colonnes d'une matrice: les données sont centrées par soustraction de la valeur moyenne puis standardisées en divisant par l'écart-type. Cette étape permet d'homogénéiser les données, elle est nécessaire car les variables étudiées ne sont pas exprimées avec des unités similaires.

Ensuite, la fonction *dist* du paquet *{stats}* (« R: The R Stats Package » 2016) nous a permis de calculer les distances euclidiennes d_{jk} (ou indices de dissimilarité) entre toutes les stations étudiées selon l'équation (3).

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_i^n (x_{ij} - x_{ik})^2} \quad (3)$$

Avec d_{jk} la distance euclidienne entre la station x_j et la station x_k , et n le nombre de paramètres physiques de notre étude.

Finalement, la fonction *hclust* du paquet *{stats}* a réalisé la CAH à partir des indices de dissimilarité en utilisant la méthode de Ward. Cette méthode élève au carré les indices de dissimilarité

II. Méthodes

et applique le critère de classification de Ward qui consiste à minimiser la variance au sein de chaque groupe (Murtagh et Legendre 2011).

2.4.4. Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode factorielle faisant partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles, cette méthode permet de représenter graphiquement les individus (dans notre cas les classes de profondeur des stations) ainsi que les variables (dans notre cas les paramètres physiques locaux) dont ils dépendent (« AnalyseComposantesPrincipales-AgroParisTech.pdf » 2016). Cette représentation permet d'identifier des structures de liaisons entre les individus en préservant les distances euclidiennes dans l'espace réduit.

Une ACP consiste en cinq étapes :

- centrage des données ;
- calcul de la matrice de dispersion de la matrice centrée ;
- calcul des valeurs propres de la matrice de dispersion, qui mesurent la variance des composantes principales ;
- calcul des vecteurs propres, triés dans l'ordre décroissant des valeurs propres correspondantes, qui donnent l'orientation des axes-descripteurs par rapport aux composantes principales ;
- calcul des coordonnées des points-objets dans le nouveau système d'axes principaux.

L'ACP a été réalisée à l'aide de la fonction *rda* du paquet *{vegan}* (Oksanen et al. 2016) à partir de notre tableau de données environnementales, et un graphe en deux dimensions a été produit. Nous avons colorié les représentations des stations selon leur groupe d'appartenance déduit de la CAH.

2.4.5. Relations de corrélations entre la classification et les données environnementales

Nous avons utilisé le coefficient de corrélation de rang de Spearman (formule (2), cf. § 2.4.2, p. 11) afin de mettre en évidence les relations de corrélations entre les résultats de la CAH et le tableau de valeurs de données environnementales. Ces calculs nous ont donné des premiers résultats afin de déterminer quelles variables environnementales ont influé la classification. Pour étudier les résultats de la CAH, nous avons ajouté quatre colonnes à notre base de données : la colonne « Groupe » contient les chiffres des groupes d'appartenance (1, 2 ou 3) pour chaque classe de profondeur, les colonnes « Groupe 1 », « Groupe 2 » et « Groupe 3 » contiennent un 1 pour chaque site appartenant au groupe désigné et 0 s'il n'y appartient pas. Nous avons ensuite calculé les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre ces nouvelles colonnes et les variables environnementales étudiées.

2.4.6. Méthode CART : arbre de régression

La méthode CART (Classification And Regression Trees) permet d'établir une hiérarchie des variables explicatives, elle a été réalisée afin d'expliquer quels paramètres environnementaux influent sur les groupes obtenus par la classification et a été illustrée avec un arbre de régression. Cette méthode complète les coefficients de corrélations obtenus précédemment. Pour cela nous avons utilisé la fonction *rpart* du paquet *{rpart}* (Therneau, Atkinson, et port 2015) et la fonction *rpart.plot* du paquet *{rpart.plot}* (Milborrow 2016).

2.5. Relations entre la base de données environnementale et la base de données floristique

2.5.1. Analyse Factorielle des Correspondances

Une analyse factorielle des correspondances (AFC) est une variante de l'ACP. Il s'agit d'une analyse symétrique : les lignes et les colonnes jouent le même rôle. Les descripteurs (ici, les espèces de macrophytes) doivent donc être de même nature et exprimés dans la même unité, ce qui rend l'AFC populaire pour les comparaisons de relevés de communautés. Elle ignore les absences (zéros) et s'avère donc très sensible aux espèces peu fréquentes. Il faut donc éliminer du jeu de données les espèces les moins fréquentes (dont l'occurrence est de 1, 2 ou 3).

Nous avons utilisé cette analyse afin de représenter graphiquement les similarités entre stations du point de vue de la présence et de l'abondance des espèces.

Dans l'espace réduit, les distances entre les objets (ici, les classes de profondeur des stations) sont des approximations de leur distance du χ^2 donnée par l'équation (4). Cette distance se base sur la matrice des probabilités conditionnelles dans laquelle les valeurs d'abondance sont divisées par la somme marginale des lignes.

$$\chi^2(x_1, x_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^p \frac{y_{++}}{y_{+j}} \left(\frac{y_{1j}}{y_{1+}} - \frac{y_{2j}}{y_{2+}} \right)^2} \quad (4)$$

Avec $\chi^2(x_1, x_2)$ la distance du χ^2 entre l'objet 1 et l'objet 2, p le nombre de descripteurs, y_{++} la somme des valeurs de tous les descripteurs dans tous les objets, y_{+j} la somme des valeurs du descripteur j dans tous les objets, y_{1j} et y_{2j} les valeurs du descripteur j dans l'objet 1 et l'objet 2, y_{1+} et y_{2+} les sommes des valeurs de tous les descripteurs dans l'objet 1 et dans l'objet 2.

L'AFC a été réalisée avec la fonction *CA* du paquet *{FactoMineR}* (Husson et al. 2016) et un graphe en deux dimensions a été produit. Sur ce graphe, nous avons colorié les stations selon leur groupe d'appartenance de la CAH de manière à mettre en évidence un premier lien entre les espèces de plantes et l'environnement.

2.5.2. Espèces indicatrices : méthode IndVal

Dufrêne et Legendre (1997) présentent une méthode permettant d'obtenir les espèces indicatrices et les assemblages d'espèces caractérisant des groupes de sites. L'IndVal (Indicator Value) est la valeur indicatrice d'une espèce dans un groupe de sites, elle est définie comme étant le produit de deux quantités A et B. La quantité A (ou Spécificité) est la probabilité que le site étudié appartienne au groupe de sites cible en considérant que l'espèce concernée y ait été trouvée. La quantité B (ou Fidélité) est la probabilité de trouver l'espèce concernée dans les sites appartenant au groupe cible. Afin d'identifier les espèces indicatrices et les assemblages d'espèces indicateurs des groupes obtenus par la CAH, les valeurs A, B Indval et valeur P associée ont été calculées avec la fonction *multipatt* du paquet *{indicspecies}* (Caceres et Jansen 2015; De Cáceres 2013) pour chaque espèce dans chaque groupe.

II. Méthodes

2.5.3. Analyse Canonique des Correspondances

L'analyse canonique des correspondances (ACC) est une méthode multivariée permettant d'expliquer les relations entre les assemblages biologiques d'espèces et leur environnement. Elle est similaire à l'AFC, mais elle intègre en plus la régression sur les variables environnementales. Nous avons utilisé sa représentation graphique afin de déterminer les relations entre les espèces, les variables environnementales étudiées et les classes de profondeur des stations. Nous avons colorié les classes de profondeur des stations selon leur groupe d'appartenance de la CAH.

III. Résultats

3.1. Etude de la base de données environnementales

3.1.1. Profils des données environnementales

Les résultats suivants sont l'interprétation des boîtes à moustaches représentant les données environnementales par station se situant en Annexe 2, et du Tableau 1 donnant les valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales, d'écart-types et d'erreurs standards pour chaque variable environnementale.

Tableau 1: Tableau des valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales, écarts-types et erreurs standards des variables environnementales étudiées

	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type	Erreur standard
MO (%)	1,11	0,79	0,27	5,36	0,87	0,10
Grain 1 mm (%)	0,19	0,11	0	1,40	0,27	0,03
Grain 0,5 mm (%)	6,06	6,02	0,24	17,99	4,25	0,51
Grain 0,2 mm (%)	91,06	91,19	70,91	98	5,77	0,69
Grain 0,063 mm (%)	2,63	1,95	0,11	9,97	1,92	0,23
Grain 0,05 mm (%)	0,06	0,04	0	0,28	0,06	0,01
Pente (degrés)	3,80	1,97	0,07	18,43	4,52	0,54
Keddy (sans dimension)	627 394,20	554 092,40	55 489,04	1 440 042	404 918,60	48 397,03
RES (%)	55,64	66,50	0	100	36,05	4,31

Les pourcentages de matière organique dans les sédiments sont majoritairement inférieurs à 1%, il n'y a pas de différence est-ouest notable. Les valeurs les plus élevées ont été principalement mesurées dans les stations situées au sud-ouest du lac, elles dépassent rarement 2%.

Les éléments de granulométrie compris entre 0,49 et 0,2 mm sont les plus importants dans les échantillons (valeur moyenne de 91,06%). Nous remarquons que les valeurs de la rive est sont inférieures à celles de la rive ouest, toutes classes de profondeur confondues. Pour toutes les autres tailles de grain, les valeurs de la rive est sont supérieures à celles de la rive ouest, toutes classes de profondeur confondues.

Nous remarquons que les stations situées au nord du lac (stations n° 144, 166, 170 et 178) se différencient des autres stations, notamment par les valeurs de la granulométrie. Les valeurs pour les grains de diamètre 1 mm, 0,063 mm et 0,05 mm y sont plus élevées que pour les autres stations. Elles sont plus faibles pour la maille 0,2 mm et sensiblement égales pour la maille 0,5 mm. Ces variations peuvent être expliquées par la localisation des stations à proximité du tributaire principal du lac de

III. Résultats

Lacanau, le canal des Etangs, dont les eaux proviennent du lac de Carcans-Hourtin et de zones de marais adjacentes telles que le Palu de Molua ou l'étang de Cousseau.

Les valeurs des pentes des berges sont plus importantes sur la rive ouest que sur la rive est et peuvent aller jusqu'à 18,43°. Ce résultat est cohérent avec le profil dissymétrique des fonds est-ouest lié à la rupture du plateau landais sur la dune littorale (cf §1.1, p. 3). Il est cependant intéressant de voir que les pentes sont relativement homogènes à l'est (inférieures à 5°) tandis qu'elles sont hétérogènes à l'ouest. Certaines stations des rives ouest (18, 40, 52, 96) présentent des pentes relativement proches des stations des rives est.

Les valeurs de l'indice d'exposition au vent et aux vagues (ou indice de Keddy) sont plus élevées à l'est qu'à l'ouest, les vents dominants sont majoritairement orientés à l'ouest et nord-ouest donc la rive est plus exposée. En rive est, la station 305 est protégée, en rive ouest les stations 40, 52, 96 et 104 sont plutôt exposées.

Les valeurs de remise en suspension des sédiments semblent hétérogènes, elles vont de 0% à 100%. Elles paraissent plus élevées à l'est qu'à l'ouest. Cette remise en suspension est élevée à l'ouest pour les stations 18 et 52, elle est faible à l'est pour la station 280.

3.1.2. Relations de corrélations

Le Tableau 2 contient les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées. Les coefficients jugés significatifs (dont la valeur-p est inférieure à 0,01) sont marqués d'une étoile.

Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées

	MO	Grain 1 mm	Grain 0,5 mm	Grain 0,2 mm	Grain 0,063 mm	Grain 0,05 mm	Pente	Keddy	RES
MO	1	0,1157	0,1633	-0,2026	0,0499	0,2976	0,0531	-0,2368	-0,1356
Grain 1 mm	0,1157	1	0,7779*	-0,8733*	0,6933*	0,7207*	-0,6130*	0,4372*	0,5133*
Grain 0,5 mm	0,1633	0,7779*	1	-0,9347*	0,4545*	0,5850*	-0,4918*	0,2956	0,3601*
Grain 0,2 mm	-0,2026	-0,8733*	-0,9347*	1	-0,6992*	-0,7264*	0,5761*	-0,3748*	-0,4796*
Grain 0,063 mm	0,0499	0,6933*	0,4545*	-0,6992*	1	0,6960*	-0,6633*	0,5722*	0,5928*
Grain 0,05 mm	0,2976	0,7207*	0,5850*	-0,7264*	0,6960*	1	-0,4056*	0,2271	0,3422*
Pente	0,0531	-0,6130*	-0,4918*	0,5761*	-0,6633*	-0,4056*	1	-0,7198*	-0,5193*
Keddy	-0,2368	0,4372*	0,2956	-0,3748*	0,5722*	0,2271	-0,7198*	1	0,2669
RES	-0,1356	0,5133*	0,3601*	-0,4796*	0,5928*	0,3422*	-0,5193*	0,2669	1

III. Résultats

Nous remarquons dans un premier temps qu'aucun coefficient de corrélation lié à la matière organique n'est significatif, il n'est donc pas pertinent de relier cette variable à une autre variable environnementale.

Les mesures de granulométrie des sédiments sont toutes corrélées entre elles. Le grain 0,2 mm est cependant opposé aux autres : les coefficients le liant aux autres grains sont négatifs, alors que les autres tailles de grains sont liées de manière positive.

Les grains 1 mm et 0,063 mm sont positivement corrélés à l'indice de Keddy et la remise en suspension des sédiments, et le grain 0,2 mm est négativement corrélé avec la remise en suspension.

La pente est corrélée avec la granulométrie, de manière positive avec le grain 0,2 mm et de manière négative avec les autres tailles de grains. Elle est également fortement corrélée avec l'indice de Keddy et la RES. La pente semble donc être liée à tous les paramètres sauf la concentration en matière organique.

L'indice de Keddy et la RES ne sont pas corrélés entre eux bien que tous deux sont corrélés négativement avec la pente et positivement avec les grains 1 mm et 0,063 mm.

3.1.3. Classification Ascendante Hiérarchique

La Figure 4 représente les positions géographiques des classes de profondeur, coloriées selon les résultats de la CAH.

Au regard des résultats obtenus, nous avons choisi de regrouper les classes de profondeur des stations étudiées en trois groupes, car ce nombre nous a paru être le plus cohérent et interprétable notamment au vu du graphe des Silhouettes situé en Annexe 3. Chaque barre représente le degré d'appartenance (compris entre -1 et 1) de chaque objet au groupe auquel il est rattaché, le but est d'obtenir une valeur moyenne des Silhouettes maximale (Rousseeuw 1987).

Le groupe 1 comprend 10 classes de profondeur, le groupe 2 en comprend 42 et le groupe 3 en comprend 18.

III. Résultats

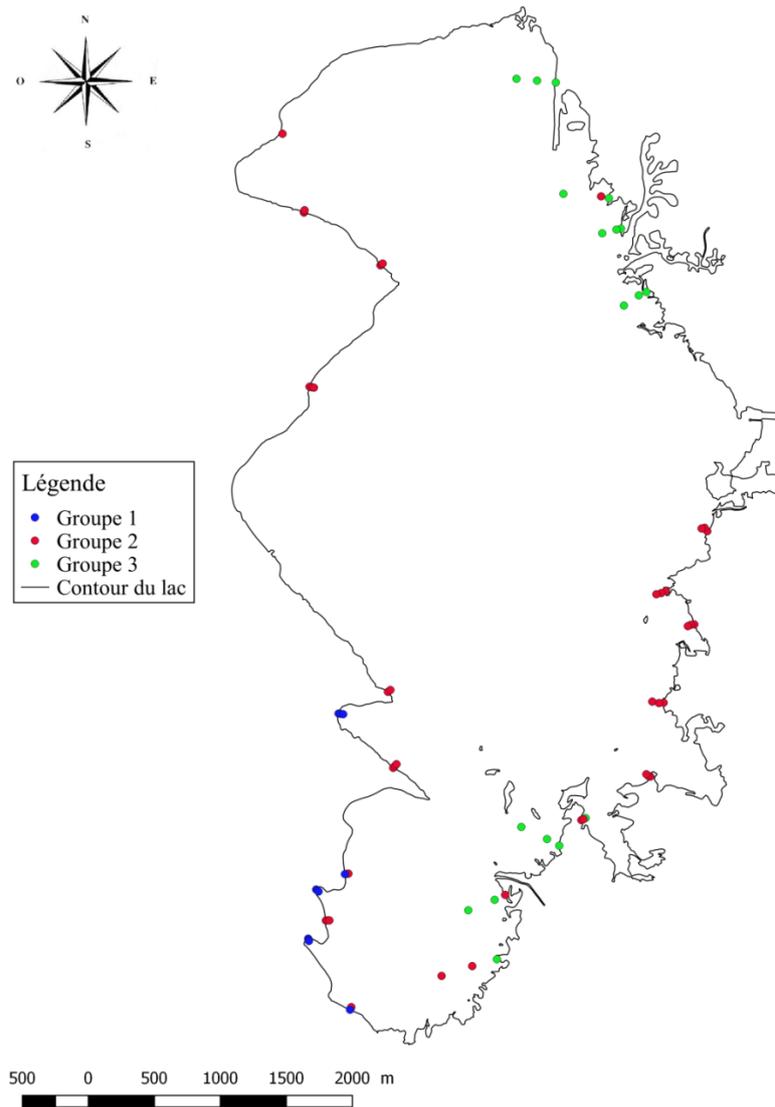


Figure 4 : Positions géographiques des classes de profondeur sur le lac de Lacanau, coloriées selon les résultats de la CAH

Nous observons sur la Figure 4 que certaines classes de profondeur sont confondues sur certaines stations, cela est dû à une pente des fonds élevée. Les groupes rassemblent les stations et non pas les classes de profondeur. Le groupe 1 (en bleu sur la Figure 4) se situe exclusivement à l'ouest, et le groupe 3 (en vert sur la Figure 4) se situe exclusivement à l'est.

3.1.4. Analyse en Composantes Principales

La Figure 5 est la représentation graphique de l'ACP, les classes de profondeur y sont coloriées selon les groupes obtenus par la CAH. Les pourcentages de variance des axes 1 et 2 sont respectivement 52,02% et 19,80%, on peut alors estimer que 71,82% de l'information est représentée sur le graphique.

III. Résultats

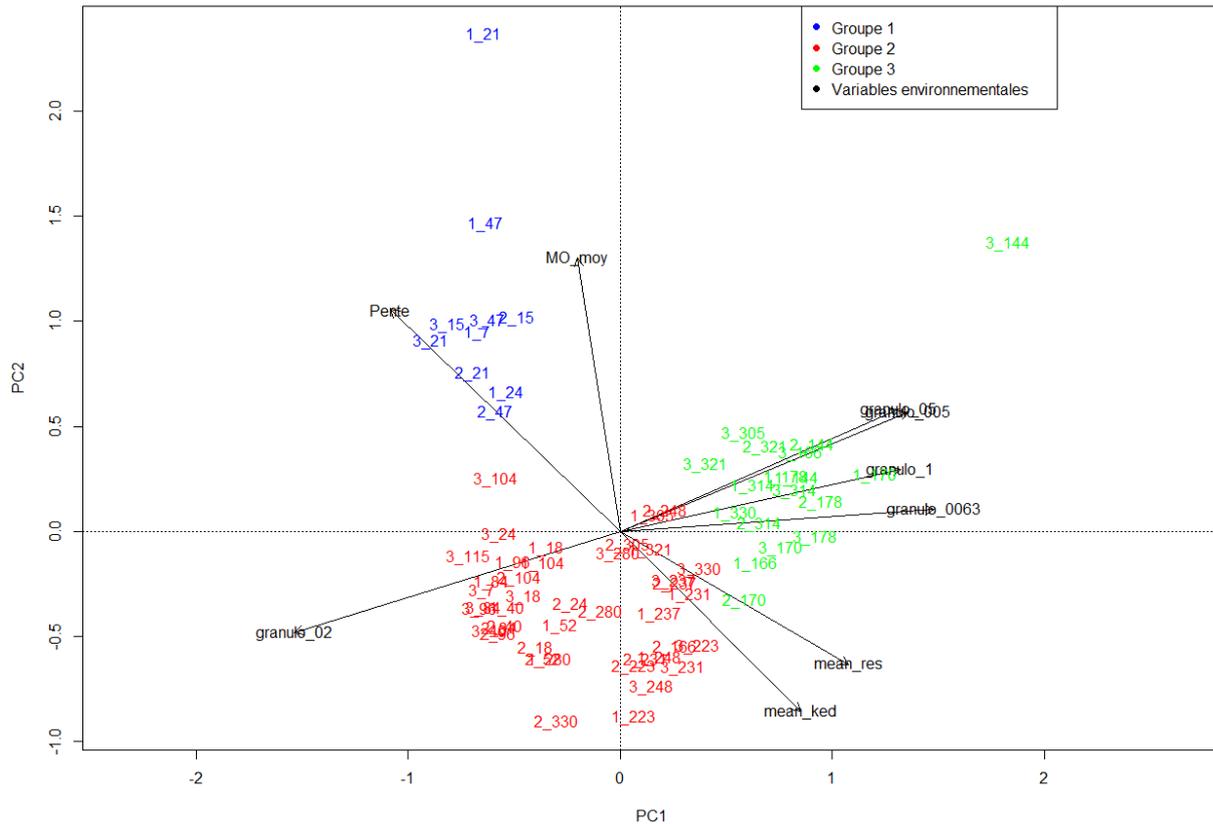


Figure 5 : Analyse en composantes principales

La proximité des points entre eux témoignent de leur ressemblance. Nous constatons que les points sont regroupés par couleur, ce qui confirme donc la similarité des sites au sein des groupes.

En observant les identifiants des sites, nous constatons que les sites situés sur les rives est du lac sont positionnés à droite de l'axe 2 et les sites situés sur la rive ouest sont à gauche de ce même axe. Cette dichotomie est/ouest sépare donc le groupe 2.

Les relations entre les variables environnementales (représentées par les flèches sur la Figure 5) sont représentées par les angles les séparant. Cette ACP confirme donc les coefficients de corrélation de Spearman obtenus précédemment. En effet, les flèches représentant les différentes mailles de la granulométrie des sédiments le long de l'axe 1 sont proches les unes des autres sauf celle correspondant à 0,2 mm qui est opposée. Les flèches correspondant à la pente et la matière organique sont opposées à celles de l'indice de Keddy et de la RES plutôt sur l'axe 2. Ces deux derniers paramètres ne sont pas corrélés entre eux dans le tableau des coefficients de corrélation de rang de Spearman (Tableau 2, cf § 3.1.2, p. 17) mais sont très proches l'un de l'autre dans l'ACP.

Le groupe 1 semble caractérisé par des pentes fortes et des concentrations en matière organique importantes. Le groupe 3 semble caractérisé par la granulométrie.

3.1.5. Corrélations classification-environnement

Le Tableau 3 présente les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les résultats de la CAH et les variables environnementales étudiées. Les coefficients jugés significatifs (dont la valeur-p est inférieure à 0,01) sont marqués d'une étoile.

III. Résultats

Tableau 3: Tableau des coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées et les résultats de la CAH

	Groupes	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
MO	0,1264	0,5233*	- 0,5167	0,1604
Grain 1 mm	0,6175*	- 0,3022	- 0,3609*	0,6220*
Grain 0,5 mm	0,3967*	0,0445	- 0,4235*	0,4929*
Grain 0,2 mm	- 0,5739*	0,1475	0,5060*	- 0,6611*
Grain 0,063 mm	0,7385*	- 0,4890*	- 0,2683	0,6642*
Grain 0,05 mm	0,5451*	- 0,1296	- 0,4942*	0,6346*
Pente	- 0,7130*	0,5961*	0,1004	- 0,5639*
Keddy	0,4319*	- 0,5638*	0,1986	0,2153
RES	0,5654*	- 0,5427*	0,0100	0,4035

La classification des sites semble être déterminée par toutes les variables environnementales étudiées, à l'exception de la concentration en matière organique dans les sédiments.

Le groupe 1 semble être majoritairement constitué de sites situés au fond d'anses protégées du vent et des vagues situés à l'ouest du lac, aux pentes fortes et dont les sédiments sont riches en matière organique.

Le groupe 2 semble indépendant de l'hydrodynamique. Il est plutôt déterminé par une teneur en matière organique faible et par la présence d'un sédiment homogène constitué principalement par des sables de taille comprise entre 0,49 et 0,2 mm. Le groupe est largement distribué sur les rives du lac.

Le groupe 3 semble bénéficier d'une granulométrie des sédiments hétérogène (les coefficients sont plus élevés que pour le groupe 2) constitués de sables très fins (0,05 et 0,063 mm) à moyens (1 mm), les sites sont situés sur des secteurs situés à l'est dont les pentes sont faibles.

Ces résultats confirment les relations entre les groupes et les paramètres environnementaux observés sur la représentation graphique de l'ACP (Figure 5, cf. § 3.1.4, p. 19).

3.1.6. Méthode CART : arbre de régression

La Figure 6 représente l'arbre de régression des résultats de la méthode CART. Les cases de couleur correspondent aux groupes de la CAH : le premier chiffre indique le groupe, et le ratio correspond au nombre de sites du groupe dont les caractéristiques correspondent à celles indiquées par l'arbre.

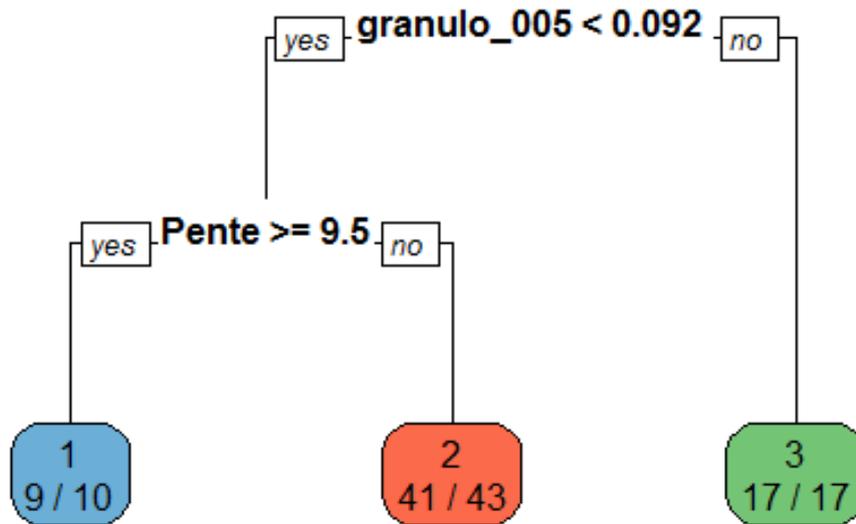


Figure 6 : Arbre de régression

Pour rappel, la moyenne sur l'ensemble des classes de profondeur des stations du pourcentage de grains de taille 0,05 mm (granulo_005 dans l'arbre) dans les sédiments est de 0,06, et la moyenne des pentes est de 3,80°. Les médianes sont respectivement de 0,04% et de 1,97°.

Les sites des groupes 1 et 2 présentent peu de grains fins compris entre 0,05 mm et 0,063 mm. Le groupe 1 semble caractérisé par des pentes fortes (supérieures à la moyenne et à la médiane) tandis que les sites du groupe 2 ont des pentes plus faibles. Les sites du groupe 3 présentent un pourcentage de grains fins dans leurs sédiments plus élevés que dans les autres groupes et plus élevé que la moyenne et la médiane.

3.2. Relations entre plantes et environnement

La liste des espèces étudiées, leur nom scientifique, leur code et leur occurrence parmi les sites étudiés sont listés dans le tableau situé en Annexe 4. Les codes sont utilisés pour désigner les espèces dans le tableau de données utilisé pour les analyses, nous les retrouvons dans nos résultats notamment sur les représentations graphiques de l'AFC (Figure 7) et de l'ACC (Figure 8).

Il y a en tout 34 espèces de macrophytes, dont 2 algues, 4 amphiphytes, 22 héliophytes et 6 hydrophytes. Les espèces patrimoniales *Littorella uniflora*, *Lobelia dortmanna* et *Caropsis verticillatinundata* y sont notamment présentes, ainsi que les espèces exotiques *Lagarosiphon major*, *Egeria densa* et *Ludwigia spp.*

3.2.1. Analyse Factorielle des Correspondances

La représentation graphique de l'AFC se situe en Figure 7. Les pourcentages de variance des axes 1 et 2 sont respectivement 17,09% et 12,01%.

III. Résultats

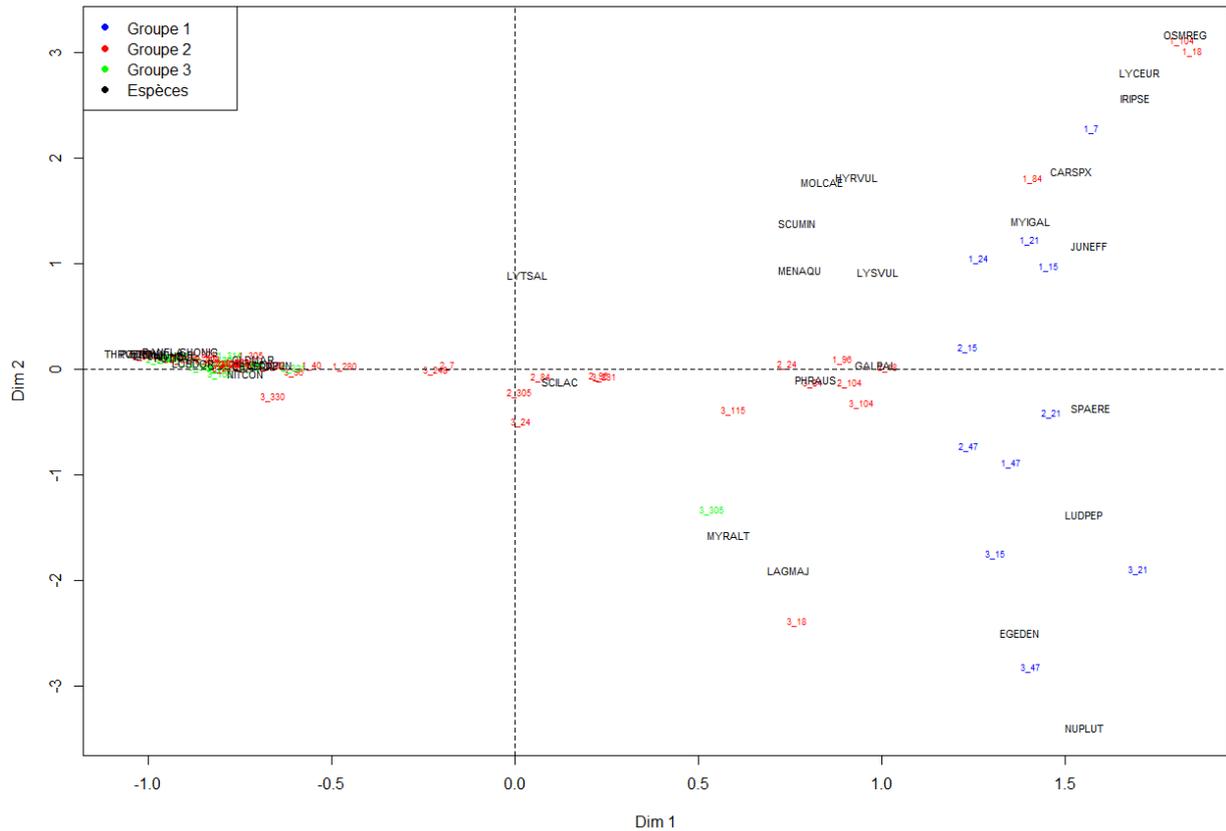


Figure 7 : Analyse factorielle des correspondances

Les proximités entre objets, entre descripteurs, et entre objets et descripteurs témoignent d'une ressemblance ou d'une association

Nous observons, de même que sur la représentation graphique de l'ACP (Figure 5, cf. § 3.1.4, p. 19), une différence est/ouest au niveau de la répartition des sites : les sites situés à l'est sont à gauche de l'axe 2 et les sites situés à l'ouest sont à droite de ce même axe.

Le regroupement compact situé à gauche de l'axe 2, au niveau de l'axe 1, semble être représenté par des espèces caractéristiques des pelouses à isoétides telles que *Lobelia dortmanna* (LOBDOR) et *Littorella uniflora* (LITUNI), l'espèce endémique *Caropsis verticillatinundata* (THRVER), les characées *Nitella confervacea* (NITCON) et *Chara fragifera* (CHAFRA), ainsi que *Juncus bulbosus* (JUNBUL) (*Cahiers d'habitats, Natura 2000: Habitats humides*, s. d.). Ce regroupement semble concerner l'intégralité du groupe 3 et une partie du groupe 2.

Les espèces de type hydrophytes, plantes totalement immergées, dont les espèces exotiques hydrophytes *Lagarosiphon major* (LAGMAJ) et *Egeria densa* (EGEDEN), ainsi que l'amphiphyte *Ludwigia peploides* (LUDPEP), semblent être situées en dessous de l'axe 1, à droite de l'axe 2, à l'exception des espèces *Potamogeton natans* (POTNAT) et *Potamogeton polygonifolius* (POTPOL) qui sont situées dans le groupement compact mentionné précédemment. Les espèces situées dans la partie supérieure de l'axe 2 appartiennent principalement au type biologique des héliophytes, plantes émergées dont les racines sont le plus souvent immergées.

III. Résultats

Le groupe 1 semble être représenté par les espèces *Iris pseudacorus* (IRIPSE), *Carex sp* (CARSPX), *Myrica gale* (MYIGAL), *Juncus effusus* (JUNEFF), *Sparganium erectum* (SPAERE), *Ludwigia peploides*, *Egeria densa* et *Nuphar lutea* (NUPLUT).

3.2.2. Espèces indicatrices : méthode IndVal

Les résultats obtenus par la méthode IndVal se situent en Annexe 5. Ces résultats confirment ceux de l'AFC (Figure 7, cf. § 3.2.1, p. 22), notamment en ce qui concerne les espèces indicatrices du groupe 1 dont les espèces envahissantes *Ludwigia peploides* et *Egeria densa* font partie. De plus, on retrouve bien les espèces caractéristiques des pelouses à isoétides comme étant indicatrices des groupes 2 et 3. Les espèces *Eleocharis multicaulis* (ELEMUL) et *Potamogeton polygonifolius* semblent également être représentatives du groupe 3.

Les sites des groupes 3 et de la partie caractérisée par les rives est du groupe 2 semblent correspondre à des habitats d'eaux stagnantes à végétation vivace oligotrophique planitiaire à collinéenne des régions atlantiques, telles que les communautés à Scirpe piquant (*Schoenoplectus pungens*, notée SCNPUN) et Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna*, notée LOBDOR) définies dans les cahiers d'habitats du réseau Natura 2000 (*Cahiers d'habitats, Natura 2000: Habitats humides*, s. d.). Ce type d'habitat bénéficie d'un niveau d'eau variable et de substrats oligotrophes (pauvres en éléments nutritifs).

3.2.3. Analyse Canonique des Correspondances

La représentation graphique de la CCA se situe en Figure 8. Les pourcentages de variance des axes 1 et 2 sont respectivement 50,56% et 16,79%.

III. Résultats

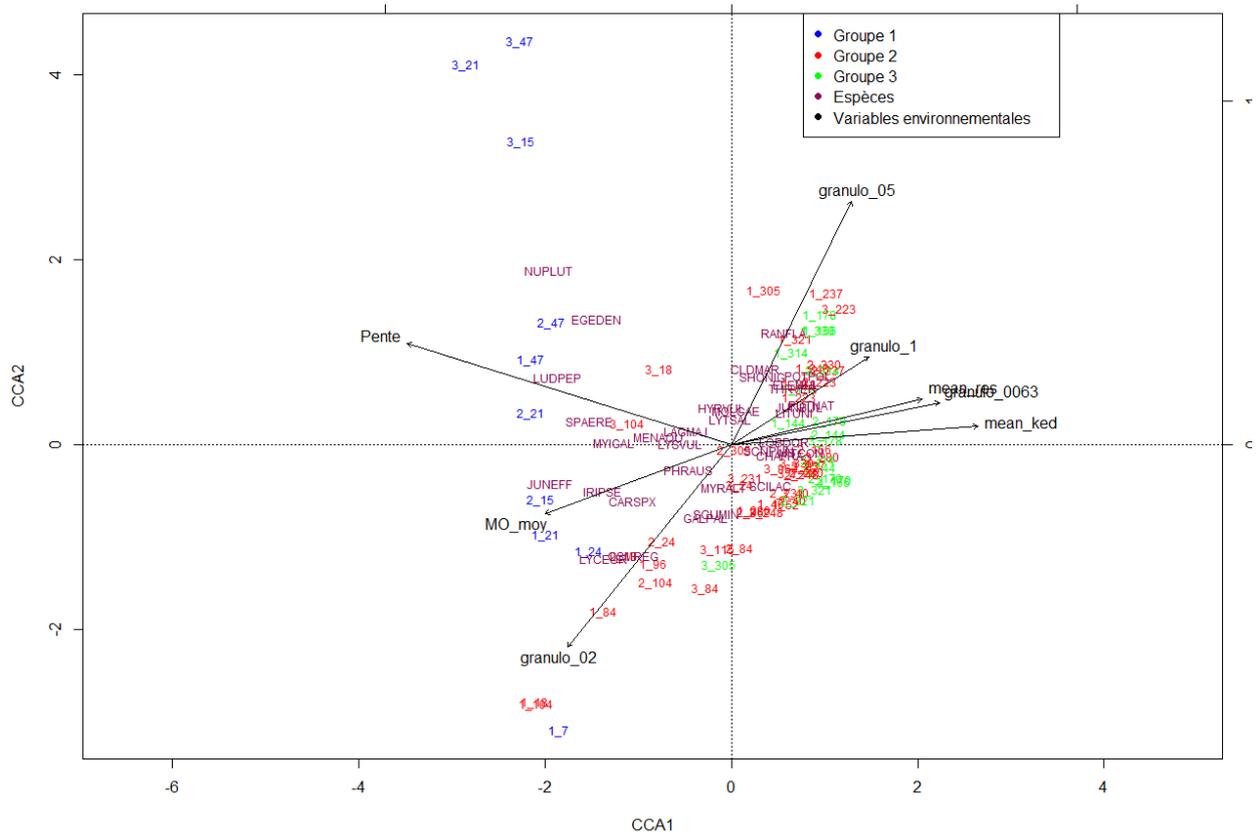


Figure 8 : Analyse canonique des correspondances

Ce graphique permet de synthétiser les résultats précédemment obtenus sur la flore et de les interpréter à l'aide des paramètres environnementaux étudiés. Les héliophytes «communs» (sites des groupes 1 et 2) semblent être favorisés par un pourcentage de matière organique élevé, et les hydrophytes «communs» indicatrices du groupe 1, dont les espèces exotiques, semblent être favorisés par des pentes élevées. Ces caractéristiques se retrouvent dans les anses protégées du vent et des vagues de la rive ouest du lac où se situent les sites concernés.

Les isoétides présents dans le groupe 3 et une partie du groupe 2, principalement les sites situés à l'est, semblent sensibles à la granulométrie et à une hydrodynamique élevée.

La dichotomie est/ouest est marquée par les paramètres physiques ainsi que par la répartition des macrophytes sur les sites.

IV. Discussion

4.1. Interprétation des résultats

Les « Cahiers d'habitats » fournissent l'état des connaissances sur les espèces et espaces qui constituent le réseau français Natura 2000. Le tome 3 « Habitats humides » définit des habitats naturels français à partir des espèces de macrophytes. Ces modèles d'habitats sont utiles à la gestion des milieux car ils servent de guide pour les identifier et analyser leur état de conservation. Ils permettent également d'identifier les sites favorables ou défavorables à certaines espèces (exotiques ou patrimoniales) et établissent des propositions de gestion propres à chaque site, notamment en ce qui concerne la conservation ou restauration d'espèces patrimoniales. La connaissance de l'état des populations et des communautés, ainsi que les facteurs influençant la distribution et les assemblages d'espèces sont alors primordiaux afin d'appliquer un mode de gestion adapté à un milieu.

Nous avons cherché dans cette étude à mettre en évidence les relations entre les macrophytes et l'hydromorphodynamique sur des zones littorales du lac de Lacanau. Pour cela, nous avons calculé ou modélisé des variables environnementales liées à l'hydrodynamique et la morphologie des berges : la concentration en matière organique dans les sédiments, la granulométrie des sédiments, la pente à proximité des berges, l'exposition au vent et aux vagues, et la remise en suspension des sédiments. Nous avons dans un premier temps étudié les relations entre ces variables, et défini trois types de biotopes physiques littoraux. Nous avons ensuite identifié les communautés végétales aquatiques les colonisant à partir de relevés floristiques, de la composition spécifique et des pourcentages de recouvrement, de manière à identifier les principaux facteurs des biotopes physiques influençant les distributions et les assemblages d'espèces.

L'étude des variables physiques a montré une dichotomie est/ouest prononcée, surtout en ce qui concerne la pente à proximité des berges. Ce profil, similaire à celui des autres lacs de la région, est dû à la formation des dunes sur le littoral aquitain et à l'accumulation d'eau derrière ces dernières (Dutartre 1986; Bertrin et al. 2013; Cellamare 2009). Cette dichotomie due aux paramètres environnementaux a été confirmée par la représentation géographique de la CAH (Figure 4) et la représentation graphique de l'ACP (Figure 5).

Nous avons calculé les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les variables environnementales étudiées, il en résulte que la fraction de matière organique dans les sédiments est la seule variable à ne pas avoir de relation avec les autres. Ce résultat fait de la matière organique un paramètre important car indépendant des autres, cependant les paramètres influençant le plus notre CAH (et donc la répartition des sites en groupes distincts) sont la granulométrie fine et la pente d'après les résultats obtenus par la méthode CART (Figure 6).

Nous avons pu répartir les sites étudiés (classes de profondeur de 25 stations) en trois groupes distincts par une CAH selon les variables environnementales citées précédemment. Les caractéristiques de chacun de ces groupes ont pu être déduites à partir de la représentation géographique de la CAH (Figure 4), la représentation graphique de l'ACP (Figure 5), les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les résultats de la CAH et les variables environnementales (Tableau 3), et de l'arbre de régression de la méthode CART (Figure 6). Les sites correspondants au groupe 1 sont situés à l'ouest dans des anses protégées du vent et des vagues et aux pentes fortes, dont les sédiments sont riches en matière organique. Le groupe 2 peut être distingué en deux parties : l'une

IV. Discussion

regroupe des sites à l'ouest du lac et l'autre à l'est. Ce groupe semble indépendant de l'hydrodynamique. Le groupe 3 regroupe des sites situés à l'est, dont les pentes et teneurs en matière organique sont faibles et à la granulométrie des sédiments hétérogène. Les groupes 1 et 2 semblent bénéficier d'une granulométrie des sédiments plus homogène que celle observée dans le groupe 3, dominée dans chaque échantillon par la fraction correspondant à un grain d'une taille comprise entre 0,49 et 0,2 mm. Cette fraction correspond à celle constituant principalement le sable des dunes littorales, le sable des landes étant constitué de sables relativement plus fins.

Après avoir caractérisé ces trois types de biotopes différents à l'aide des variables environnementales, nous avons identifié les communautés végétales qui les colonisent. La représentation graphique de l'AFC (Figure 7), la méthode IndVal (cf. § 3.2.2, p. 24) et la représentation graphique de l'ACC (Figure 8) nous ont permis d'observer la répartition des espèces de macrophytes sur les rives du lac, et de caractériser les groupes de la CAH par des espèces indicatrices de ces milieux. De plus, ces analyses croisées des variables environnementales et de la répartition des espèces macrophytiques nous ont permis d'identifier les variables environnementales influençant leur répartition.

Nous avons observé une dichotomie est/ouest marquée au niveau de la répartition des macrophytes sur les sites. La rive ouest (groupe 1 et une partie du groupe 2) semble majoritairement colonisée par des hydrophytes communs et par des plantes exotiques à caractère envahissant, ces espèces y bénéficient de pentes et de fractions de matière organique dans les sédiments élevées. Les espèces envahissantes *Ludwigia peploides* et *Egeria densa* sont situées uniquement dans les sites appartenant au groupe 1 (anses à l'abri du vent) tandis que *Lagarosiphon major* peut être trouvé dans les trois groupes. La rive est (autre partie du groupe 2 et intégralité du groupe 3) semble être un lieu favorable pour les pelouses à isoétides composées notamment de *Lobelia dortmanna* et *Littorella uniflora*. On y retrouve également l'espèce endémique *Caropsis verticillatinundata* et les characées *Chara fragifera* et *Nitella confervacea*.

Les biotopes que nous avons associés aux communautés de plantes sont cohérents car ils coïncident avec les observations et résultats préliminaires obtenus lors de précédentes études réalisées dans l'équipe CARMA mais qui n'avaient pas encore fait l'objet de ces analyses à cette échelle (Ribaudou, Jan, et Bertrin 2015; Bertrin et al. 2012; Bertrin et al. 2013). Les pelouses à isoétides se retrouvent donc dans des milieux aux pentes douces et agités par les vagues, ce qui contribue à une fraction de matière organique pauvre dans les sédiments. Les biotopes favorables aux communautés d'espèces exotiques se situent dans les anses à l'abri du vent, les sédiments y sont riches en matière organique car ces hydrophytes participent à son accumulation.

L'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) définit une espèce ou un groupe d'espèces végétales ou animales comme étant bioindicatrice si les caractéristiques observées (occurrence, abondance, biomasse, caractéristiques ou « traits » biologiques) fournissent une indication sur le niveau de dégradation du milieu (« bioindication-outils-d-evaluation.pdf » 2016). Les macrophytes peuvent alors servir d'indicateurs trophiques (Clarke et Wharton 2001) car ils assurent la production de biomasse, élément de base du processus d'eutrophisation, et reflètent donc l'état et le niveau de fonctionnement d'un écosystème. Ils sont désignés dans la DCE comme l'un des quatre éléments de qualité biologique et sont examinés de manière spécifique afin de fournir des informations sur la morphodynamique et les dérèglements hydrochimiques de leur habitat (Chauvin et al. 2014). Des indices biologiques relatifs aux macrophytes ont été mis en place afin d'évaluer l'état écologique d'un cours d'eau et d'un plan d'eau : l'IBMR (Indice Biologique Macrophytique en Rivière) intégré

IV. Discussion

dans les règles nationales d'évaluation pour le deuxième cycle DCE (2015-2021) et l'IBML (Indice Biologique Macrophytique en Lacs) qui a été adopté pour le deuxième plan DCE de gestion des plans d'eau (Chauvin et al. 2014).

Les isoétides sont considérées comme de bons indicateurs des changements environnementaux car elles sont très sensibles à la sédimentation, l'acidification et l'eutrophisation des milieux où elles se trouvent (Ribaudou, Jan, et Bertrin 2015). Elles participent également à l'oxygénation de la sédimentation et à la rétention du méthane, ce qui en font des communautés à préserver dans le cadre de la problématique du réchauffement climatique. Les characées, souvent présentes sur les pelouses à isoétides, sont également reconnues comme étant indicatrices de la bonne qualité de l'eau (Bertrin et al. 2013). Ces espèces constituent des habitats à valeur patrimoniale tels que les communautés à Scirpe piquant (*Schoenoplectus pungens*) et Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna*) (*Cahiers d'habitats, Natura 2000: Habitats humides*, s. d.).

Les milieux colonisés par les espèces exotiques à caractère envahissant semblent réduits à des biotopes favorables, notamment de par leur localisation protégée du vent. Leur dynamique de colonisation doit cependant être surveillée car ces espèces sont susceptibles de créer un déficit en oxygène qui stimulerait la croissance de microalgues toxiques. De plus, la présence d'*Egeria densa* n'a pas encore été relevée dans le lac de Carcans-Hourtin (situé au nord du lac de Lacanau), sa progression est donc à surveiller (Bertrin et al. 2012). (Ribaudou, Jan, et Bertrin 2015) a montré l'absence de progression des espèces *Lagarosiphon major* et *Egeria densa* entre les années 2011 et 2014.

Cette étude permet d'envisager la possibilité d'enrichir la bioindication des milieux avec l'étude des perturbations de l'hydromorphologie.

4.2. Possibilités d'évolution de la méthode

La méthode développée et utilisée dans cette étude a produit des résultats en cohésion avec la bibliographie. Elle présente cependant des incohérences, notamment en ce qui concerne la constitution des bases de données.

Les mesures de fraction de matière organique et de granulométrie des sédiments sont ponctuelles en lieu et date, tandis que l'exposition aux vagues et au vent ainsi que la remise en suspension des sédiments sont modélisées à partir de données journalières mesurées sur cinq années (de 2009 à 2014) et moyennées par classe de profondeur. Néanmoins, il serait difficile d'obtenir des mesures de matière organique et de granulométrie journalières sur une période de plusieurs années car les prélèvements et les manipulations pour aboutir aux résultats sont chronophages. De même, réduire la période de temps utilisée pour la modélisation de l'exposition et de la RES les rendrait moins significatives car plus sujettes à une variation ponctuelle. Nous pourrions réduire ces périodes à des périodes estivales, les faisant ainsi correspondre aux moments des prélèvements de sédiments et des relevés floristiques.

Les relevés floristiques ont été effectués durant les étés des années 2013 et 2014 et sont basés sur les pourcentages de recouvrement des espèces. Ces relevés sont à la fois ponctuels et journaliers, car ils correspondent à l'état de la végétation à un moment donné et dépendent de la personne effectuant le relevé.

IV. Discussion

Nous avons pris le parti dans cette étude de ne pas considérer la profondeur dans notre base de données environnementale, mais nous l'avons intégrée à cette étude par la notion de classe de profondeur. Il en a résulté que la classification a regroupé les sites par stations et non par classe de profondeur. Intégrer la classe de profondeur directement en tant que variable dans la base de données environnementale modifierait probablement la classification. De la même manière, notre étude se concentre sur des données environnementales physiques, mais il faut garder à l'esprit que d'autres variables telles que la pollution, la minéralisation, la concentration en nutriments, la lumière, le pH, le taux d'oxygène dissous ou la température jouent également des rôles essentiels dans la croissance et la répartition des macrophytes (Hauray, Dutartre, et Peltre 2008, 37-50).

Les groupes de sites homogènes que nous avons expliqués à l'aide des variables environnementales par la CAH ont été définis au nombre de trois. Ce chiffre, malgré le fait que sa cohérence ait été vérifiée à l'aide des degrés d'appartenance, aurait pu être augmenté à quatre ou plus et aurait ainsi changé les caractéristiques des biotopes ainsi que les relations avec les communautés de plantes.

L'étude de l'influence de l'hydrodynamisme et de la morphologie des berges sur la végétation aquatique a ici été réalisée à l'échelle de la classe de profondeur. Cette étude profiterait d'un approfondissement, notamment en vérifiant que les relations obtenues à l'échelle de la classe de profondeur sont les mêmes qu'à l'échelle fine (surface $\leq 1 \text{ m}^2$). Une étude en cours utilise à cette fin des mesures de traits morphologiques des plantes tels que le nombre de pieds de chaque taxon, la hauteur moyenne et médiane des pieds, et le pourcentage de recouvrement. Ces relevés ont été effectués à l'aide de quadrats : il s'agit de carrés utilisés pour mesurer ces traits sur une surface donnée allant de 1 m^2 ou de $0,25 \text{ m}^2$, divisées en section (16 sections pour un quadrat de 1 m^2 et 4 sections pour un quadrat de $0,25 \text{ m}^2$). Entre 3 et 6 quadrats par classe de profondeur sont disposés en fonction de la surface de la classe, de la surface du quadrat utilisé, ainsi que de l'abondance et de la répartition des macrophytes. Pour étudier les relations entre les plantes, les valeurs des traits sont conservées à l'échelle des quadrats et comparées entre elles. Les méthodes ne permettant pour l'instant pas d'obtenir les valeurs des variables environnementales à l'échelle des quadrats, les traits obtenus selon les quadrats sont moyennés par classe de profondeur, permettant ainsi leur comparaison avec les variables physiques. Cette étude a montré des résultats préliminaires de relations entre plantes semblables à ceux obtenus à l'échelle des classes de profondeur, spécialement en ce qui concerne les espèces présentes dans les pelouses à isoétides : on trouve des relations de corrélation significatives entre *Littorella uniflora* et *Lobelia dortmanna*, *Littorella uniflora* et *Eleocharis multicaulis*, *Chara fragifera* et *Schoenoplectus pungens*, *Caropsis verticillatundata* et *Eleocharis multicaulis*. Les premiers résultats concernant les relations entre les variables environnementales et les plantes aquatiques ont confirmé l'influence de la pente sur la répartition de celles-ci, mais l'étude de ces relations nécessiterait la mesure des variables environnementales également à l'échelle fine.

Une étude parallèle a été menée afin de déduire les relations entre la biodiversité et les paramètres environnementaux. Il en est ressorti des relations de corrélation fortes entre le nombre d'espèce différentes par m^2 et la pente (relation négative), ainsi qu'entre le nombre d'espèce différentes par m^2 et l'indice d'exposition au vent et aux vagues (relation positive), ces résultats mériteraient d'être approfondis.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence les relations entre les macrophytes et l'hydromorphodynamique locale sur des zones littorales du lac de Lacanau : définir l'état des populations et des communautés de plantes ainsi que les facteurs physiques influençant leur distribution et les assemblages d'espèces est nécessaire à leur gestion.

Nous avons dans un premier temps étudié l'hydrodynamique et la morphologie des berges puis identifié trois types de biotopes à partir de variables environnementales. Le premier type correspond à des sites situés exclusivement à l'ouest du lac, dans des anses protégées du vent et des vagues et dont les pentes à proximité des berges sont élevés. Le deuxième type regroupe des sites à l'est et à l'ouest du lac et semble indépendant de l'hydrodynamique. Finalement le troisième type regroupe des sites situés à l'est, dont les pentes et teneurs en matière organique sont faibles et à la granulométrie des sédiments homogènes. Nous avons ensuite cherché à identifier les communautés végétales aquatiques colonisant ces milieux. La rive ouest semble majoritairement colonisée par des hydrophytes communs et par des plantes exotiques à caractère envahissant tandis que la rive est semble être un lieu favorable pour les pelouses à isoétides, cette répartition divise alors le deuxième biotope. Nous avons observé une dichotomie est/ouest prononcée au niveau des valeurs des variables environnementales étudiées ainsi que de la répartition des espèces de macrophytes. Nous avons pu définir des biotopes favorables aux espèces exotiques à caractère envahissant ainsi qu'aux pelouses à isoétides dont les espèces les constituant sont reconnues en tant que bons indicateurs écologiques. Ces résultats coïncident avec les observations et résultats préliminaires obtenus lors de précédentes études réalisées dans l'équipe CARMA mais qui n'avaient pas encore fait l'objet de ces analyses à cette échelle.

Les méthodes utilisées bénéficieraient d'améliorations, notamment en ce qui concerne la constitution des bases de données, et d'approfondissements, par exemple en étudiant les relations entre plantes et environnement à échelle fine.

BIBLIOGRAPHIE

- « AnalyseComposantesPrincipales-AgroParisTech.pdf ». 2016. Consulté le juillet 26. <http://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/AnalyseComposantesPrincipales-AgroParisTech.pdf>.
- « ArcGIS ». 2016. *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=ArcGIS&oldid=127383253>.
- Aubié, Sandrine, et Jean-Pierre Tastet. 2000. « Coastal Erosion, Processes and Rates: An Historical Study of the Gironde Coastline, Southwestern France ». *Journal of Coastal Research* 16 (3): 756-67.
- Barko, J. W., et R. M. Smart. 1983. « Effects of Organic Matter Additions to Sediment on the Growth of Aquatic Plants ». *Journal of Ecology* 71 (1): 161-75. doi:10.2307/2259969.
- Barko, John W., Douglas Gunnison, et Stephen R. Carpenter. 1991. « Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics ». *Aquatic Botany* 41 (1): 41-65. doi:10.1016/0304-3770(91)90038-7.
- Berghen, C. Vanden. 1968. « Notes sur la végétation du sud-ouest de la France VI. La végétation de la rive orientale de l'étang de Lacanau (Gironde, France) ». *Bulletin du Jardin botanique national de Belgique / Bulletin van de National Plantentuin van België* 38 (3): 255-76. doi:10.2307/3667439.
- Bertrin, Vincent, Sébastien Boutry, Alain Dutartre, et Elisabeth Lambert. 2013. « Communautés de Characées des lacs médocains (Sud-Ouest de la France). Eléments d'écologie et de distribution ». *Acta Botanica Gallica* 160 (2): 131-40. doi:10.1080/12538078.2013.812044.
- Bertrin, Vincent, Alain Dutartre, Alan Caro, Sébastien Boutry, Sylvia Moreira, et Gwilherm Jan. 2012. « Communautés végétales aquatiques des lacs médocains ».
- « bioindication-outils-d-evaluation.pdf ». 2016. Consulté le juillet 22. <http://www.onema.fr/IMG/pdf/bioindication-outils-d-evaluation.pdf>.
- « Bordeaux | Irstea ». 2016. Consulté le juillet 4. <http://www.irstea.fr/linstitut/nos-centres/bordeaux>.
- Bornette, Gudrun, et Sara Puijalon. 2010. « Response of Aquatic Plants to Abiotic Factors: A Review ». *Aquatic Sciences* 73 (1): 1-14. doi:10.1007/s00027-010-0162-7.
- Caceres, Miquel De, et Florian Jansen. 2015. *indicspecies: Relationship Between Species and Groups of Sites* (version 1.7.5). <https://cran.r-project.org/web/packages/indicspecies/index.html>.
- Cahiers d'habitats, Natura 2000: Habitats humides*. s. d. Vol. 3.
- Cellamare, Maria. 2009. « Évaluation de l'état écologique des plans d'eau aquitains à partir des communautés de producteurs primaires ». Bordeaux 1. <http://www.theses.fr/2009BOR13920>.
- Chappuis, Eglantine, Esperança Gacia, et Enric Ballesteros. 2014. « Environmental factors explaining the distribution and diversity of vascular aquatic macrophytes in a highly heterogeneous Mediterranean region ». *Aquatic Botany* 113: 72-82. doi:10.1016/j.aquabot.2013.11.007.
- Chauvin, C., V. Bertrin, S. Boutry, T. Feret, S. Lorient, et A. Dutartre. 2014. « Des méthodes basées sur les peuplements de macrophytes pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques ». *Sciences Eaux and Territoires : la Revue du IRSTEA*, n° 15: 54-59.

- Clarke, Stewart J., et Geraldene Wharton. 2001. « Sediment nutrient characteristics and aquatic macrophytes in lowland English rivers ». *Science of The Total Environment* 266 (1–3): 103–12. doi:10.1016/S0048-9697(00)00754-3.
- « Classification ascendante hiérarchique (CAH) ». 2016. Consulté le août 4. <http://larmarange.github.io/analyse-R/classification-ascendante-hierarchique.html>.
- Clement, Bernard, et Ahmed Aidoud. 2009. *Resistance against eutrophication based on 40-year diachronic study (1966-2006) on marginal wetlands of oligotrophic shallow lakes in southwest of France*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00438820>.
- « Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques | Irstea ». 2016. Consulté le juillet 22. <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/rebx/carma-contaminants-anthropiques-et-reponses-des-milieux>.
- De Cáceres, Miquel. 2013. « How to use the indicpecies package (ver. 1.7.1) ».
- « Découvrez QGIS ». 2016. Consulté le juillet 4. <http://www.qgis.org/fr/site/about/index.html>.
- Duarte, Carlos M., et Jacob Kalff. 1986. « Littoral Slope as a Predictor of the Maximum Biomass of Submerged Macrophyte communities^{1,1} ». *Limnology and Oceanography* 31 (5): 1072–80. doi:10.4319/lo.1986.31.5.1072.
- Dufrêne, Marc, et Pierre Legendre. 1997. « Species Assemblages and Indicator Species: the Need for a Flexible Asymmetrical Approach ». *Ecological Monographs* 67 (3): 345–66. doi:10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2.
- Dutartre, Alain. 1986. « Les plans d'eau du littoral aquitain. Origines et caractéristiques ». In , 17. Le Teich, Gironde.
- « fiche-tic-pgb-sig.pdf - fiche-tic-pgb-sig.pdf ». 2016. Consulté le juillet 4. <http://www.pays-bergerac.com/le-pays/document/tic/fiches-technique/fiche-tic-pgb-sig.pdf>.
- Haury, Jacques, Alain Dutartre, et Marie-Christine Peltre. 2008. *Plantes aquatiques d'eau douce*. Antony: Cemagreff-Dicova.
- Husson, Francois, Julie Josse, Sebastien Le, et Jeremy Mazet. 2016. *FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining* (version 1.33). <https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>.
- « IRSTEA | Irstea ». 2016. Consulté le juillet 4. <http://www.irstea.fr/accueil>.
- Jr, Frank E. Harrell, et with contributions from Charles Dupont and many others. 2016. *Hmisc: Harrell Miscellaneous* (version 3.17-4). <https://cran.r-project.org/web/packages/Hmisc/index.html>.
- Keddy, Paul A. 1982. « Quantifying within-lake gradients of wave energy: Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in axe lake, Ontario ». *Aquatic Botany* 14 (janvier): 41–58. doi:10.1016/0304-3770(82)90085-7.
- La Peyre, Megan K., Austin T. Humphries, Sandra M. Casas, et Jerome F. La Peyre. 2014. « Temporal variation in development of ecosystem services from oyster reef restoration ». *Ecological Engineering* 63: 34–44. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.12.001.
- « Les Plantes Invasives - Ville de Lacanau ». 2016. Consulté le mai 24. <http://www.mairie-lacanau.fr/environnement/le-lac-de-lacanau/299-les-plantes-invasives.html>.

- Madsen, J. D., P. A. Chambers, W. F. James, E. W. Koch, et D. F. Westlake. 2001. « The Interaction between Water Movement, Sediment Dynamics and Submersed Macrophytes ». *Hydrobiologia* 444 (1-3): 71-84. doi:10.1023/A:1017520800568.
- Milborrow, Stephen. 2016. *rpart.plot: Plot « rpart » Models: An Enhanced Version of « plot.rpart »* (version 2.0.1). <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart.plot/index.html>.
- Murtagh, Fionn, et Pierre Legendre. 2011. « Ward's Hierarchical Clustering Method: Clustering Criterion and Agglomerative Algorithm ». *arXiv:1111.6285 [cs, stat]*, novembre. <http://arxiv.org/abs/1111.6285>.
- Oksanen, Jari, F. Guillaume Blanchet, Michael Friendly, Roeland Kindt, Pierre Legendre, Dan McGlinn, Peter R. Minchin, et al. 2016. *vegan: Community Ecology Package* (version 2.4-0). <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>.
- « R (langage de programmation et environnement statistique) ». 2016. *Wikipédia*. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R_\(langage_de_programmation_et_environnement_statistique\)&oldid=124696190](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R_(langage_de_programmation_et_environnement_statistique)&oldid=124696190).
- « R: The R Base Package ». 2016. Consulté le juillet 26. <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/base/html/base-package.html>.
- « R: The R Project for Statistical Computing ». 2016. Consulté le juillet 4. <https://www.r-project.org/>.
- « R: The R Stats Package ». 2016. Consulté le juillet 26. <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/stats-package.html>.
- Ribaudo, Cristina, Gwilherm Jan, et Vincent Bertrin. 2015. « Interactions entre macrophytes et qualité de l'eau: le cas des isoétides et des exotiques dans les lacs aquitains ». Résultats du projet « Amélioration de l'évaluation de l'état écologique des lacs aquitains - 2014 ». Irstea- Centre de Bordeaux. <http://www.gt-ibma.eu/wp-content/uploads/2016/02/Irstea-Ribaudo-2014.pdf>.
- Rohweder, Jason, James T. Rogala, Barry L. Johnson, Dennis Anderson, Steve Clark, Ferris Chamberlin, David Potter, et Kip Runyon. 2012. « Application of Wind Fetch and Wave Models for Habitat Rehabilitation and Enhancement Projects - 2012 Update ». http://www.umesc.usgs.gov/management/dss/wind_fetch_wave_models_2012update.html.
- Rousseeuw, Peter J. 1987. « Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis ». *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20 (novembre): 53-65. doi:10.1016/0377-0427(87)90125-7.
- « S.A.G.E. Lacs Médocains, Etat des lieux ». 2004. mai. <http://www.gesteau.eaufrance.fr/sites/default/files/SAGE05005-EtatLieux-Rapport.pdf>.
- « SIG : Tout savoir sur les Systèmes d'Information Géographique | Esri France ». 2016. Consulté le juillet 4. <http://www.esrifrance.fr/sig11.aspx>.
- Strand, John A., et Stefan E. B. Weisner. 1996. « Wave Exposure Related Growth of Epiphyton: Implications for the Distribution of Submerged Macrophytes in Eutrophic Lakes ». *Hydrobiologia* 325 (2): 113-19. doi:10.1007/BF00028271.
- Tastet, Jean-Pierre, et Nigel I. Pontee. 1998. « Morpho-chronology of coastal dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France ». *Geomorphology* 25 (1-2): 93-109. doi:10.1016/S0169-555X(98)00035-X.

- Testard, P. 1995. « Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres ». *Limnologie générale*. Masson, Paris, 296–326.
- « The Comprehensive R Archive Network ». 2016. Consulté le juillet 4. <https://cran.r-project.org/>.
- Therneau, Terry, Beth Atkinson, et Brian Ripley (author of initial R. port). 2015. *rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees* (version 4.1-10). <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/index.html>.
- USACE. 1984. *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia.
- . 2002. *Coastal Engineering Manual, Engineer Manual 1110-2-1100*. 6 vol. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Xiao, Chengwei, Jiaqi Ye, Rui Máximo Esteves, et Chunming Rong. 2015. « Using Spearman's Correlation Coefficients for Exploratory Data Analysis on Big Dataset ». *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, janvier, n/a-n/a. doi:10.1002/cpe.3745.

Liste des annexes

Annexe 1 : Quelques photos de macrophytes

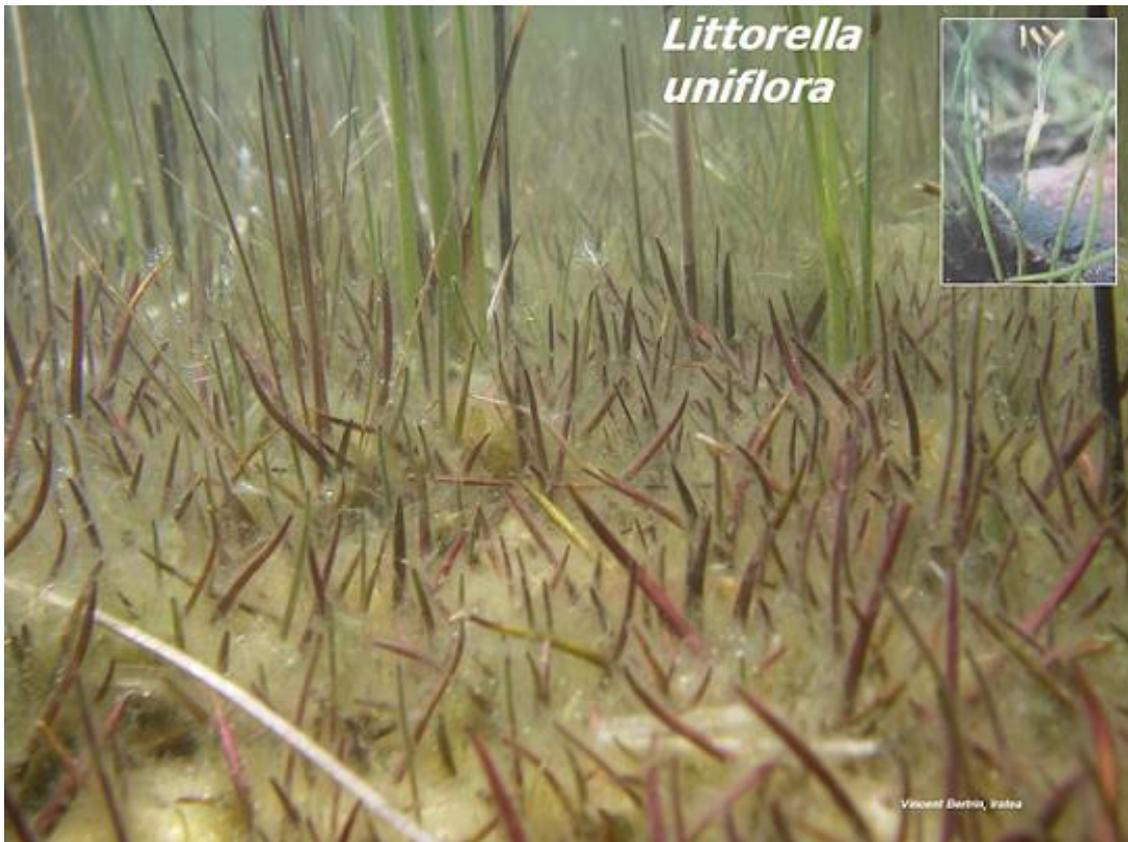
Annexe 2 : Boîtes à moustaches des données environnementales

Annexe 3 : Graphe des Silhouettes

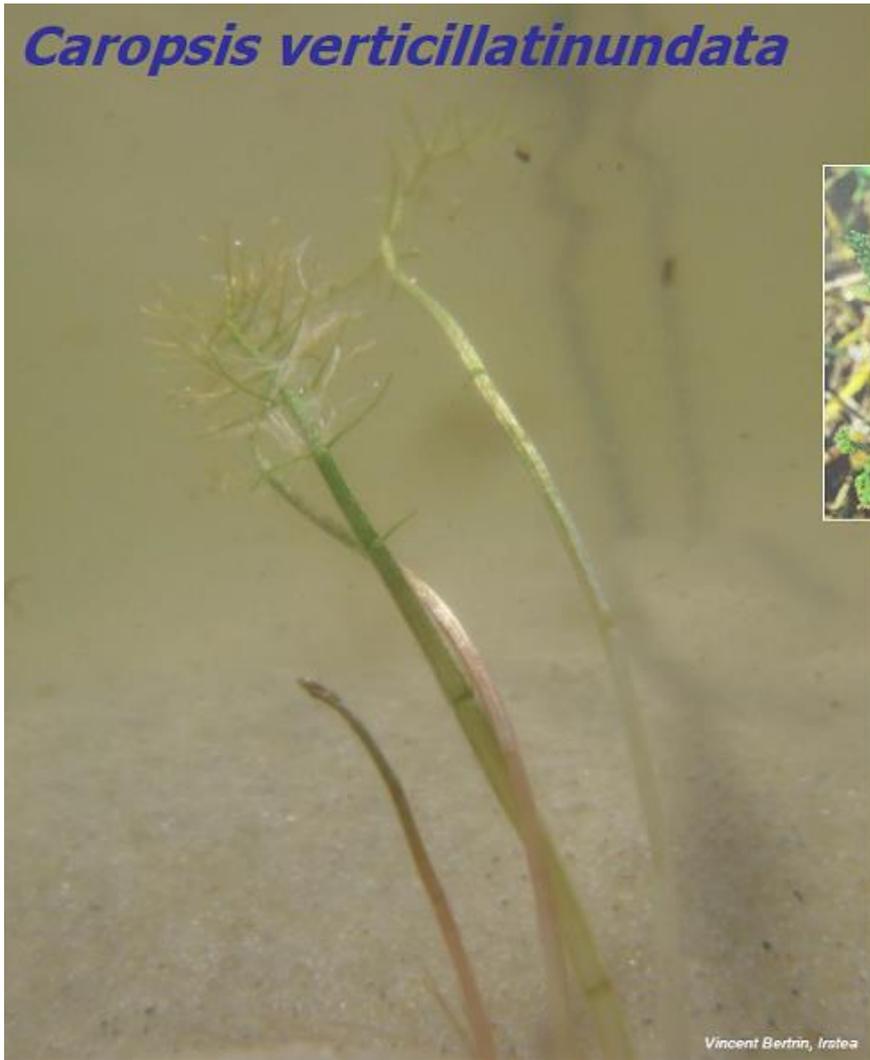
Annexe 4 : Liste des espèces de macrophytes étudiées

Annexe 5 : Résultats de la méthode Indval

Annexe 1 : Quelques photos de macrophytes



Caropsis verticillatinundata



Vincent Bertrin, Iratya

***Ludwigia* ssp.**



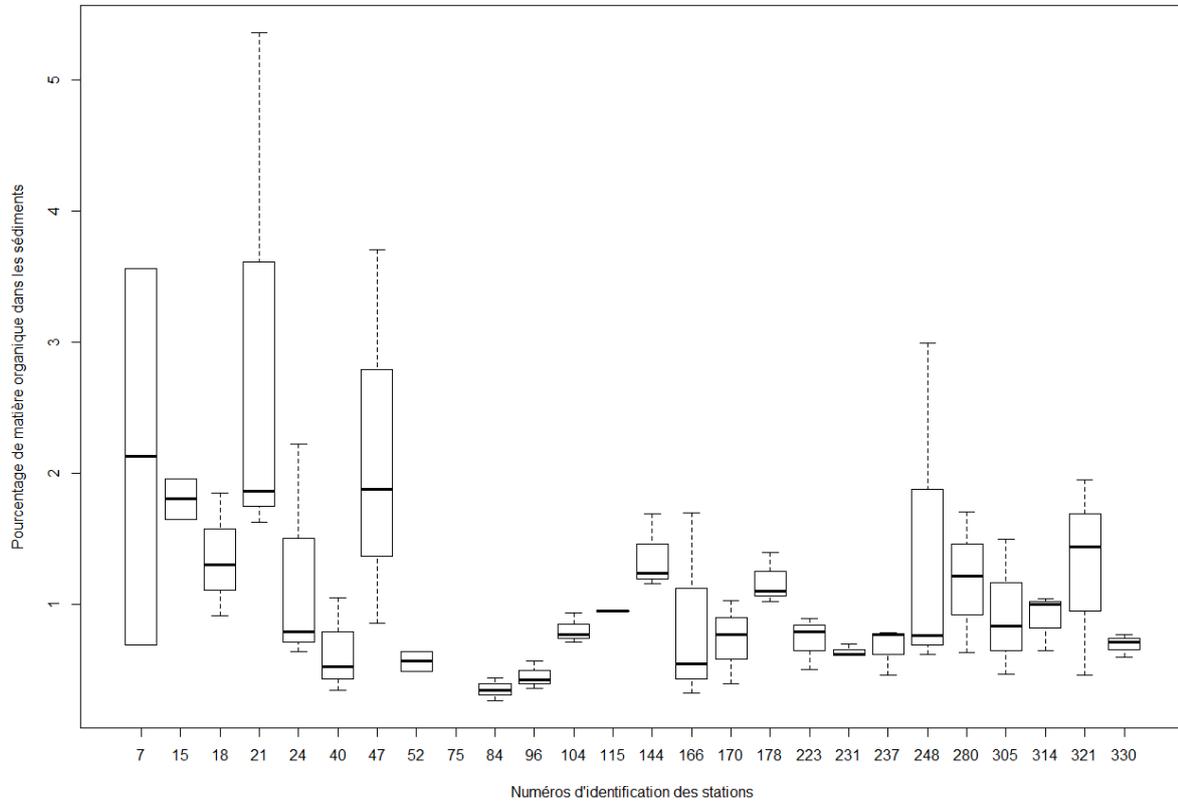


Lagarosiphon major

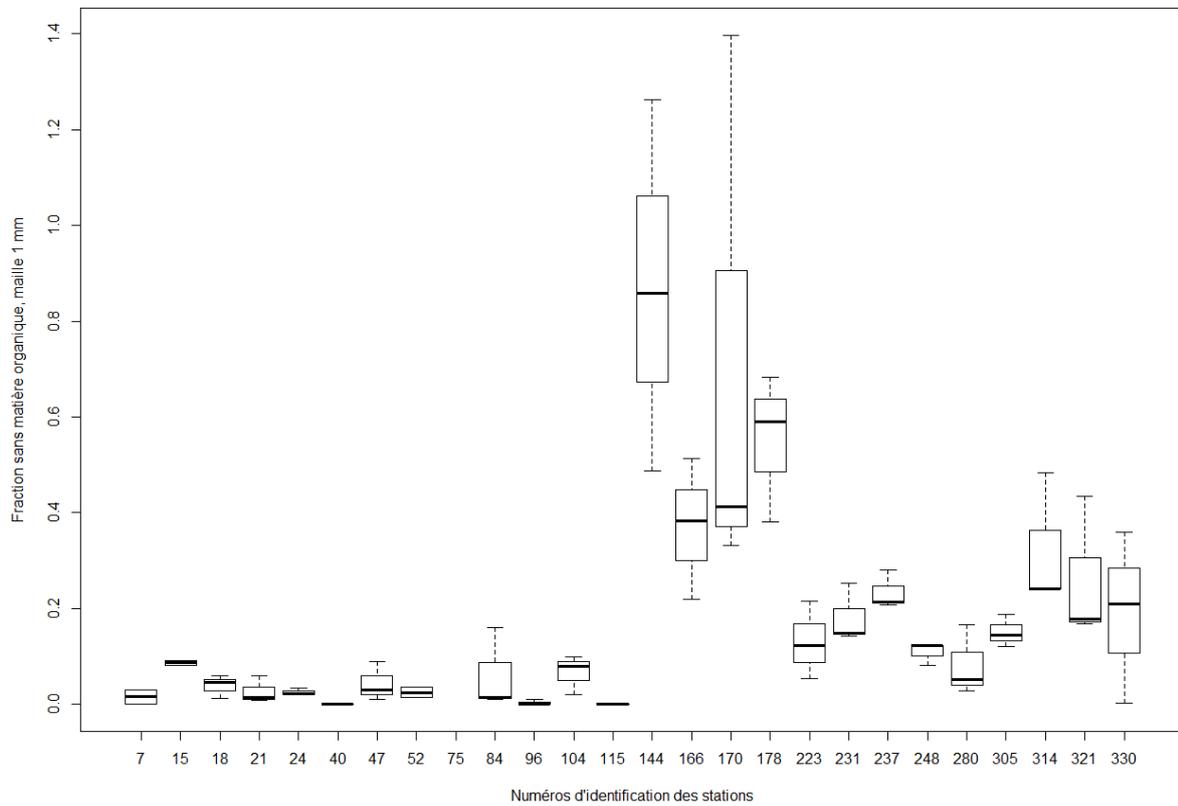


Annexe 2 : Boîtes à moustaches des données environnementales

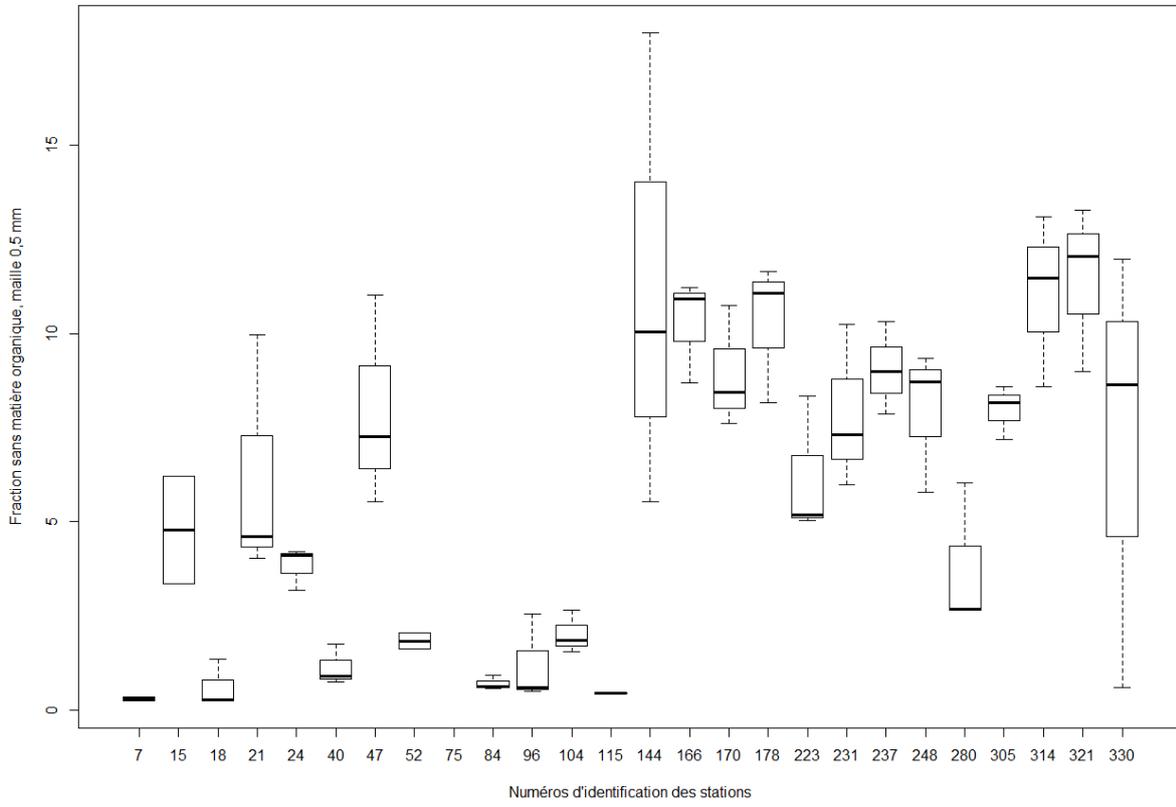
Matière organique par station



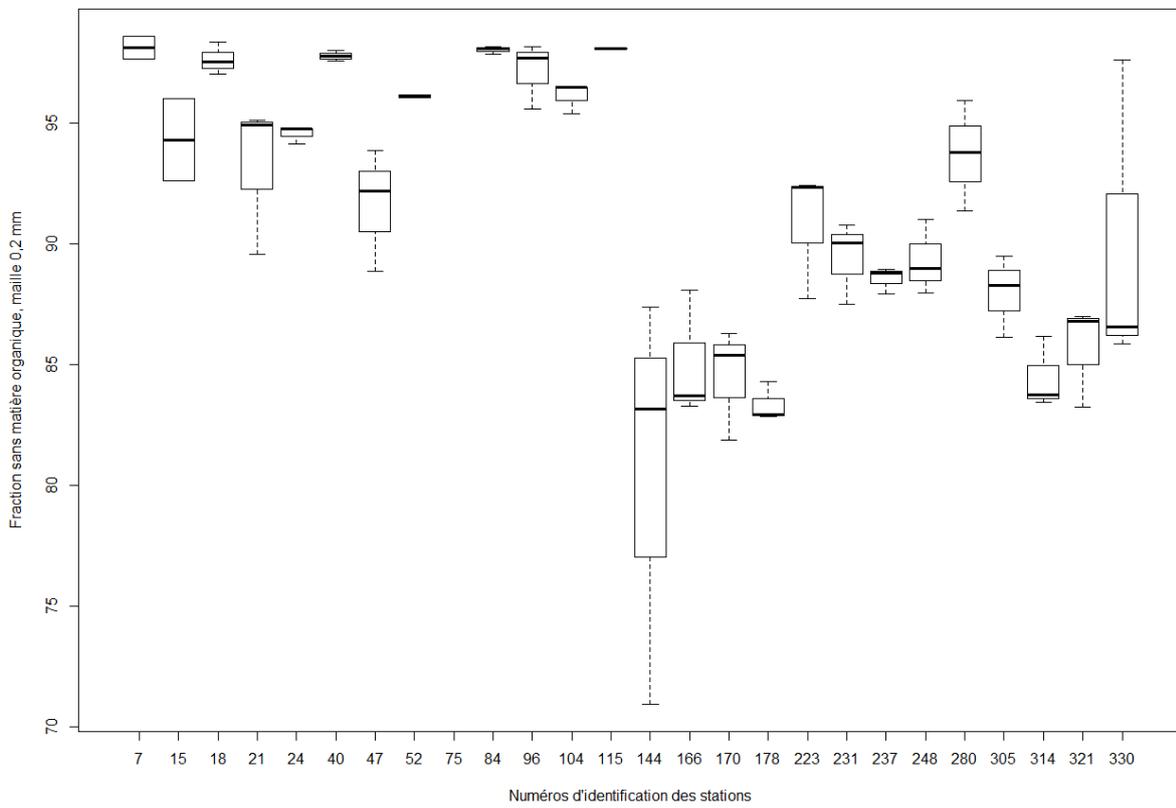
Granulométrie maille 1 mm par station



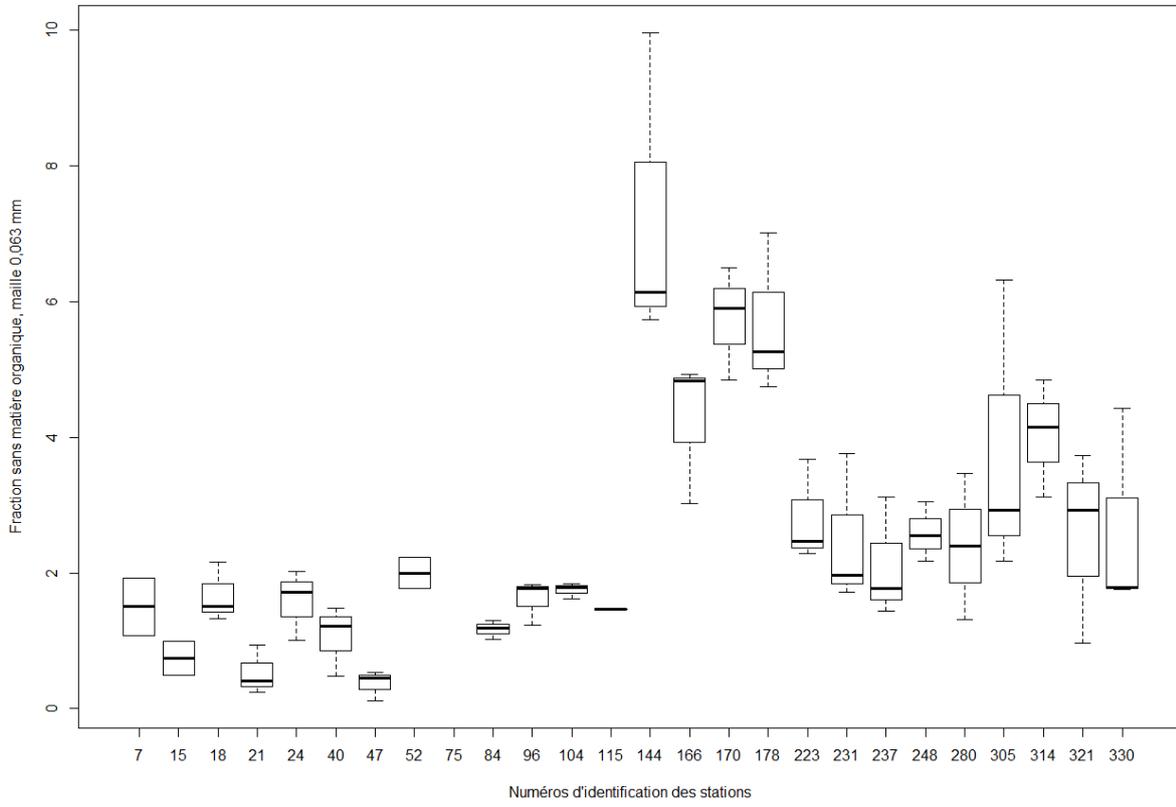
Granulométrie maille 0,5 mm par station



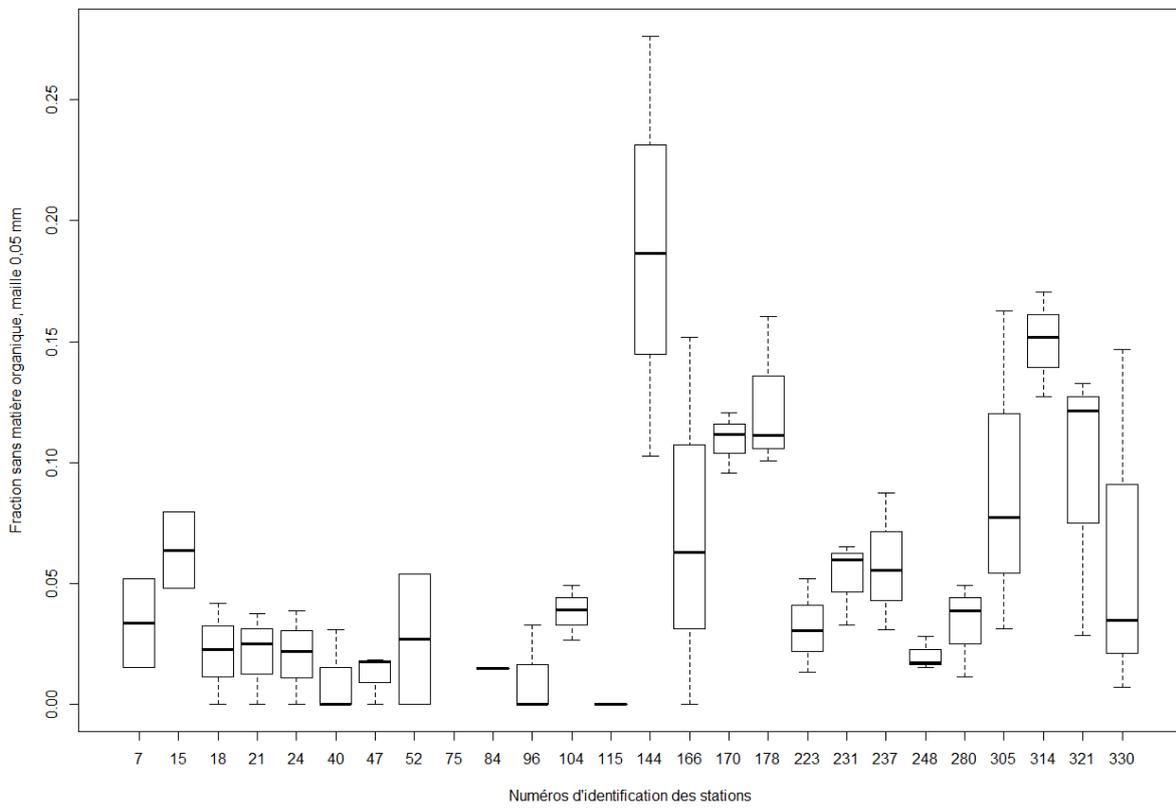
Granulométrie maille 0,2 mm par station



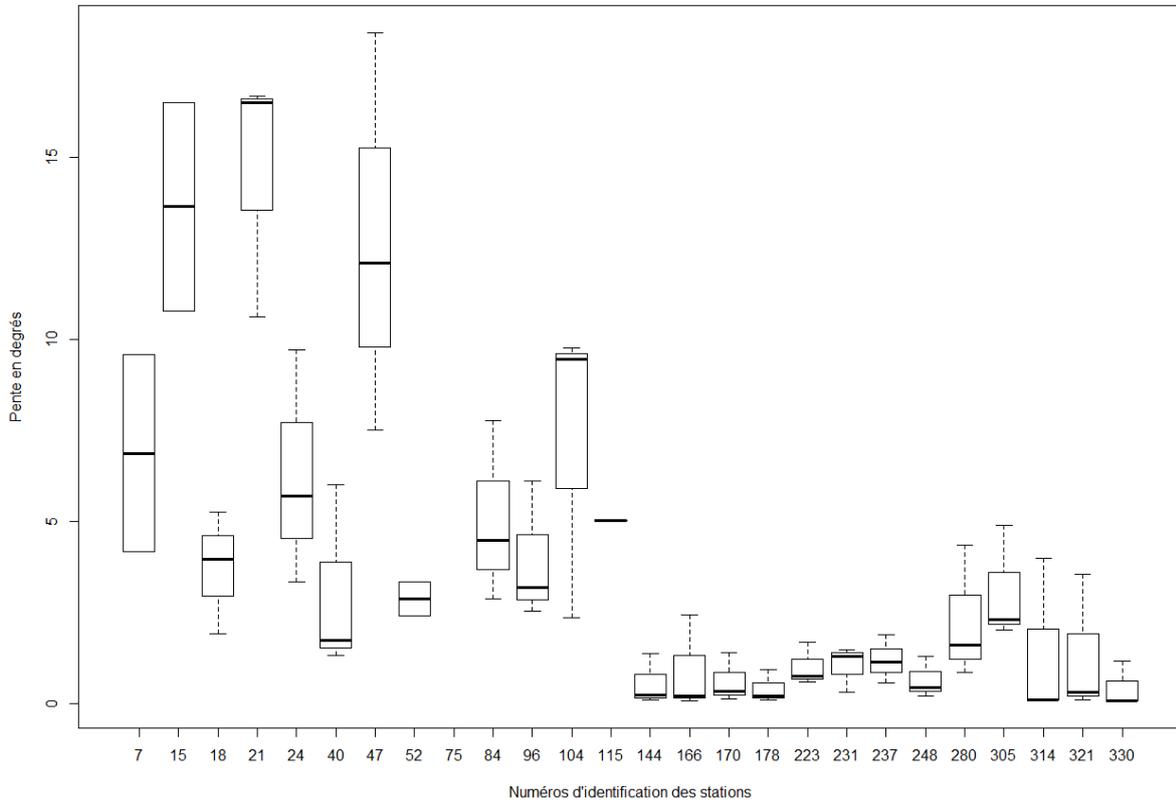
Granulométrie maille 0,063 mm par station



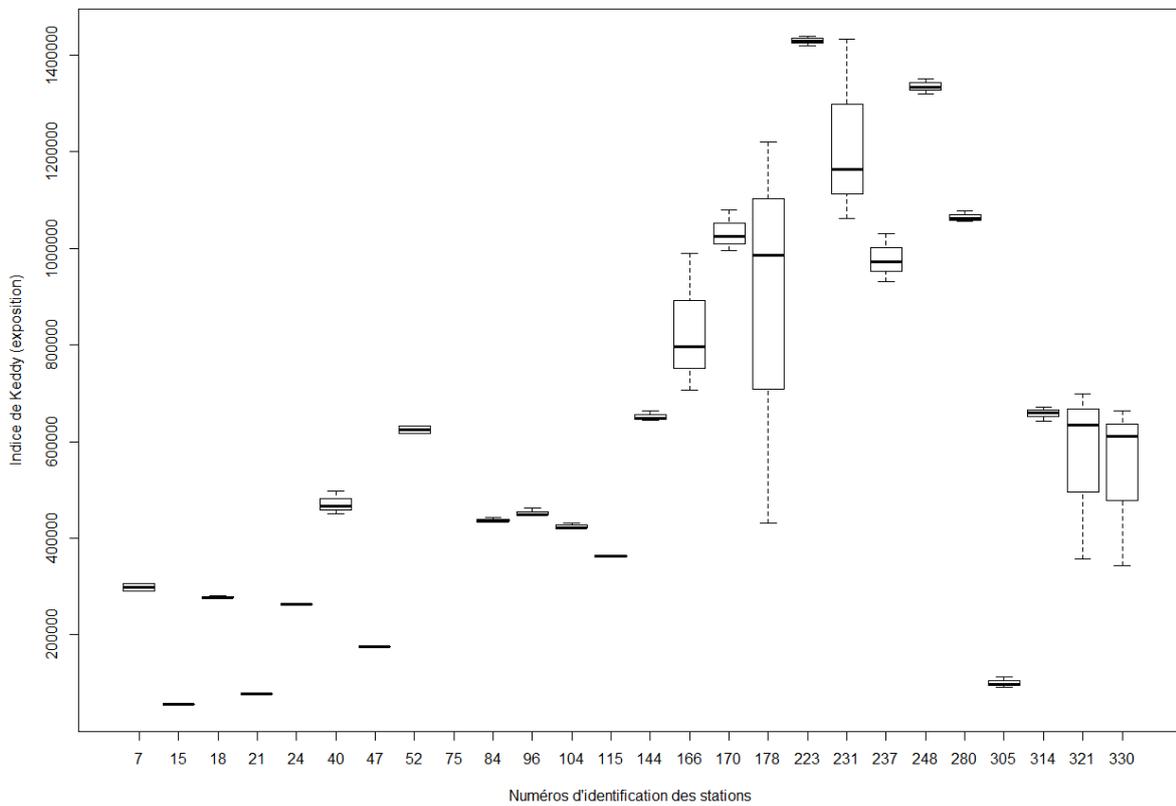
Granulométrie maille 0,05 mm par station



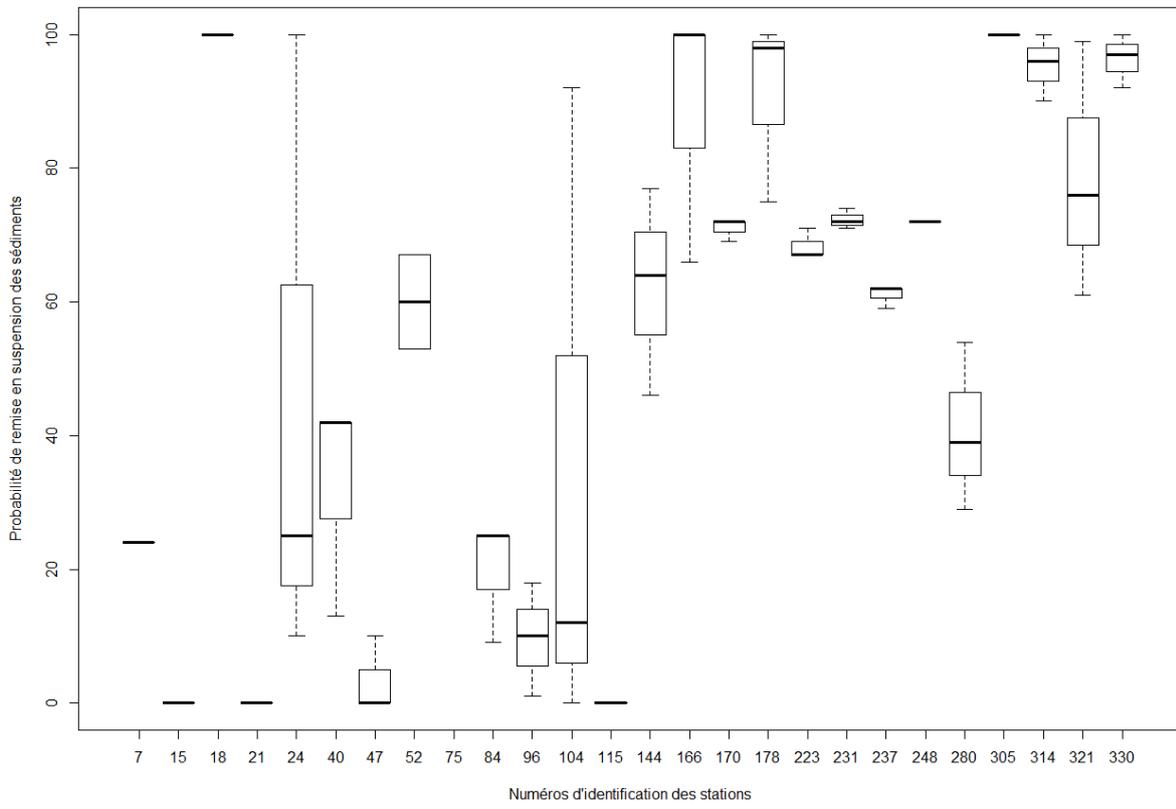
Pente par station



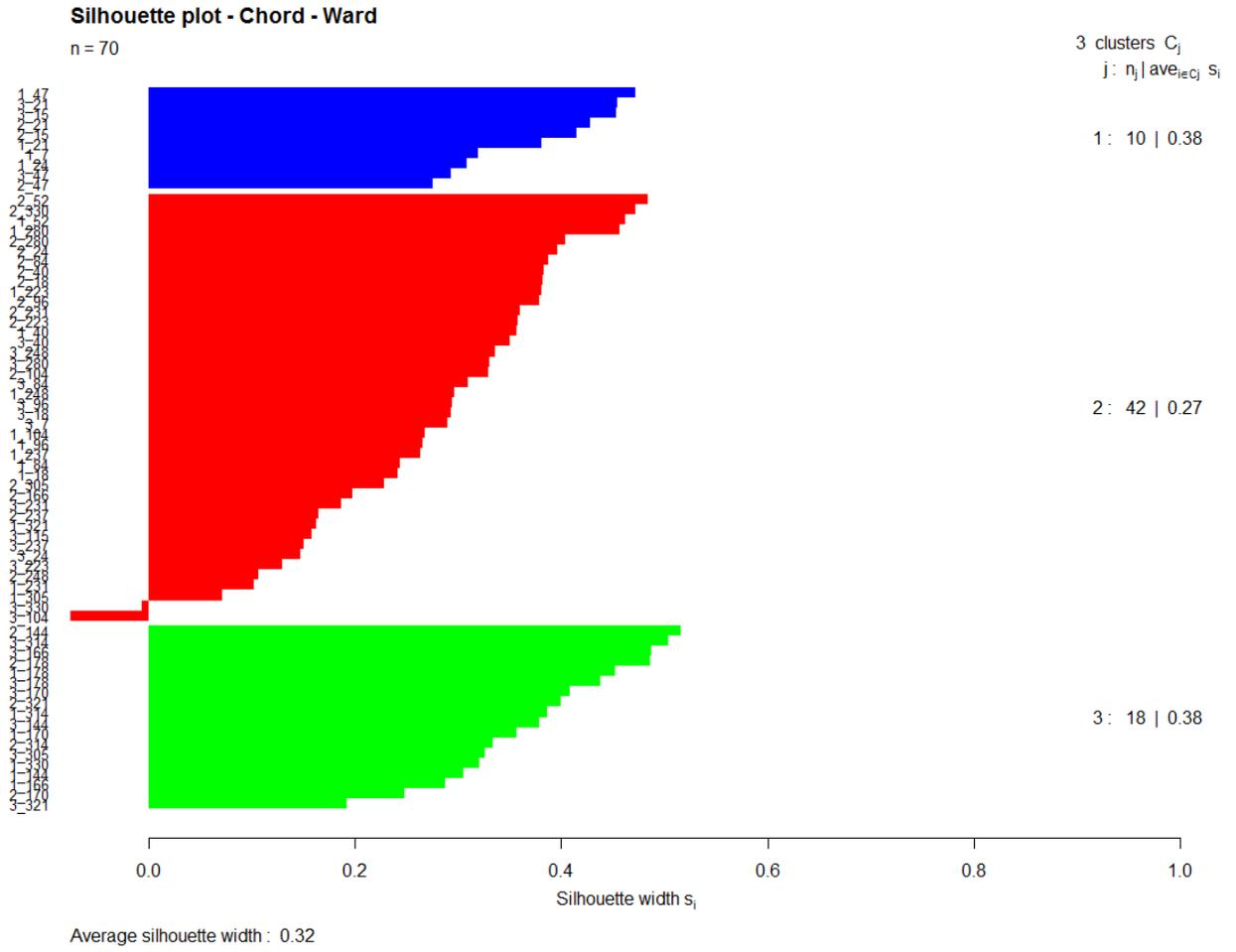
Indices de Keddy par station



Probabilité de remise en suspension par station



Annexe 3 : Graphe des Silhouettes



Annexe 4 : Liste des espèces de macrophytes étudiées

Type	Noms scientifiques	Codes	Occurences
Algues	<i>Chara fragifera</i>	CHAFRA	53
	<i>Nitella confervacea</i>	NITCON	28
Amphiphytes	<i>Caropsis verticillatinundata</i>	THRVER	9
	<i>Littorella uniflora</i>	LITUNI	20
	<i>Lobelia dortmanna</i>	LOBDOR	36
	<i>Ludwigia peploides</i>	LUDPEP	13
Hélophytes	<i>Carex sp.</i>	CARSPX	16
	<i>Cladium mariscus</i>	CLDMAR	7
	<i>Eleocharis multicaulis</i>	ELEMUL	22
	<i>Galium palustris</i>	GALPAL	3
	<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	HYRVUL	12
	<i>Iris pseudacorus</i>	IRIPSE	22
	<i>Juncus bulbosus</i>	JUNBUL	37
	<i>Juncus effuses</i>	JUNEFF	7
	<i>Lycopus europaeus</i>	LYCEUR	8
	<i>Lysimachia vulgaris</i>	LYSVUL	18
	<i>Lythrum salicaria</i>	LYTSAL	9
	<i>Mentha aquatica</i>	MENAQU	10
	<i>Molinia caerulea</i>	MOLCAE	11
	<i>Myrica gale</i>	MYIGAL	14
	<i>Osmunda regalis</i>	OSMREG	5
	<i>Phragmites australis</i>	PHRAUS	67
	<i>Ranunculus flammula</i>	RANFLA	7
	<i>Schoenoplectus lacustris</i>	SCILAC	9
	<i>Schoenoplectus pungens</i>	SCNPUN	49
	<i>Schoenus nigricans</i>	SHONIG	9
	<i>Sparganium erectum</i>	SPAERE	12
	<i>Scutellaria minor</i>	SCUMIN	3
Hydrophytes	<i>Egeria densa</i>	EGEDEN	16
	<i>Lagarosiphon major</i>	LAGMAJ	33
	<i>Myriophyllum alterniflorum</i>	MYRALT	20
	<i>Nuphar lutea</i>	NUPLUT	8
	<i>Potamogeton natans</i>	POTNAT	3
	<i>Potamogeton polygonifolius</i>	POTPOL	3

Annexe 5 : Résultats de la méthode Indval

Résultats de la méthode IndVal :

Multilevel pattern analysis

Association function: IndVal.g
Significance level (alpha): 0.05

Total number of species: 36
Selected number of species: 14
Number of species associated to 1 group: 10
Number of species associated to 2 groups: 4

List of species associated to each combination:

Group 1 #sps. 7

	A	B	stat	p.value	
SPAERE	0.9636	0.8182	0.888	0.001	***
LUDPEP	0.9999	0.7273	0.853	0.001	***
IRIPSE	0.8337	0.6364	0.728	0.001	***
EGEDEN	0.8908	0.5455	0.697	0.001	***
MYIGAL	0.9516	0.4545	0.658	0.002	**
JUNEFF	0.9997	0.3636	0.603	0.001	***
NUPLUT	0.9822	0.2727	0.518	0.010	**

Group 3 #sps. 3

	A	B	stat	p.value	
JUNBUL	0.6382	0.9444	0.776	0.005	**
NITCON	0.6973	0.7778	0.736	0.002	**
ELEMUL	0.7996	0.6111	0.699	0.003	**

Group 1+2 #sps. 1

	A	B	stat	p.value	
PHRAUS	0.9862	0.8889	0.936	0.002	**

Group 2+3 #sps. 3

	A	B	stat	p.value	
CHAFRA	1.0000	0.8525	0.923	0.001	***
SCNPUN	0.9915	0.7377	0.855	0.001	***
LOBDOR	1.0000	0.5738	0.757	0.005	**

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Présence des espèces étudiées dans les groupes :

	s.1	s.2	s.3	index	stat	p.value
CARSPX	1	0	0	1	0.4815505	0.117
CHAFRA	0	1	1	6	0.9232871	0.001***
CLDMAR	0	1	1	6	0.3387537	0.570
EGEDEN	1	0	0	1	0.6970518	0.001***
ELEMUL	0	0	1	3	0.6990282	0.003**
GALPAL	0	1	0	2	0.2156655	0.690
HYRVUL	0	1	1	6	0.4435328	0.403
IRIPSE	1	0	0	1	0.7283916	0.001***
JUNBUL	0	0	1	3	0.7763809	0.005**
JUNEFF	1	0	0	1	0.6029263	0.001***
LAGMAJ	1	1	1	7	0.6561673	NA
LITUNI	0	1	1	6	0.5725983	0.113
LOBDOR	0	1	1	6	0.7574764	0.005**
LUDPEP	1	0	0	1	0.8527488	0.001***
LYCEUR	1	0	0	1	0.4194414	0.059
LYSVUL	1	1	0	4	0.4888366	0.355
LYTSAL	0	1	1	6	0.3621430	0.491
MENAQU	1	1	1	7	0.3535534	NA
MOLCAE	0	1	1	6	0.4246503	0.407
MYIGAL	1	0	0	1	0.6576823	0.002**
MYRALT	0	1	1	6	0.5580998	0.174
NITCON	0	0	1	3	0.7364345	0.002**
NUPLUT	1	0	0	1	0.5175648	0.010**
OSMREG	1	0	0	1	0.3065441	0.346
PHRAUS	1	1	0	4	0.9362913	0.002**
POTNAT	0	1	1	6	0.2217664	0.947
POTPOL	0	0	1	3	0.2304561	0.747
RANFLA	0	1	1	6	0.3136250	0.681
RUBFRU	1	1	0	4	0.2721655	0.542
SCIFLU	0	0	1	3	0.2357023	0.377
SCILAC	0	1	1	6	0.3841106	0.450
SCNPUN	0	1	1	6	0.8552350	0.001***
SCUMIN	0	1	1	6	0.2217664	1.000
SHONIG	0	0	1	3	0.4568122	0.082
SPAERE	1	0	0	1	0.8879260	0.001***
THRVER	0	1	1	6	0.3841106	0.419

Résumé :

Cette étude s'intéresse à l'influence de l'hydrodynamique et de la morphologie des berges sur la végétation aquatique des zones littorales du lac de Lacanau. Une analyse croisée de variables environnementales et biologiques a pour but d'identifier le rôle des paramètres physiques pertinents sur la structure des communautés végétales et leur distribution à différentes échelles du lac. Nous avons dans un premier temps caractérisé trois types de biotopes physiques littoraux, puis nous avons identifié les communautés végétales qui les colonisent. Nous avons ensuite analysé les relations statistiques entre les variables physiques et la structure et la distribution de ces communautés.

Les résultats montrent une dichotomie est/ouest prononcée au niveau des valeurs des variables environnementales étudiées ainsi que dans la répartition des espèces de macrophytes. Nous avons pu caractériser des biotopes favorables aux espèces exotiques à caractère envahissant ainsi qu'aux pelouses à isoétides reconnues comme d'excellents indicateurs de l'état écologique des écosystèmes aquatiques. Des propositions d'amélioration des méthodes sont également faites, notamment en ce qui concerne la constitution des bases de données ainsi que des approfondissements tels que l'étude des relations entre plantes et environnement à échelle fine.

Mots-clefs : macrophytes, lac, Lacanau, hydromorphologie, biotope, communautés, analyses statistiques

Abstract :

The influence of hydrodynamics and morphology of the banks on aquatic vegetation in littoral areas of Lacanau Lake was studied. A cross-analysis of environmental and biological variables aims to identify the role of relevant physical parameters on the structure of plant communities and their distribution at different levels. First, we characterized three different types of littoral physical habitats and we identified the plant communities that colonize them. We then analyzed the statistical relationships between the physical variables and the structure and distribution of these communities.

Results show a strong East / West dichotomy in the values of environmental variables and in the distribution of macrophytes species. We were able to identify favorable habitats for exotic invasive species and isoetid communities who are recognized as excellent indicators of the ecological status of aquatic ecosystems. Proposals for improvements are made, notably concerning the establishment of databases, and deepenings such as studying the relationships between plants and fine-scale environment.

Key words : macrophytes, lake, Lacanau, hydromorphology, biotope, communities, statistical analyzes