Caractérisation des traits morpho-fonctionnels des communautés phytoplanctoniques des grands lacs du littoral aquitain

Emilie Prévost

▶ **To cite this version:**

Emilie Prévost. Caractérisation des traits morpho-fonctionnels des communautés phytoplanctoniques des grands lacs du littoral aquitain. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02606089

HAL Id: hal-02606089
https://hal.inrae.fr/hal-02606089

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.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE
L'UNIVERSITE FRANÇOIS RABELAIS DE
TOURS

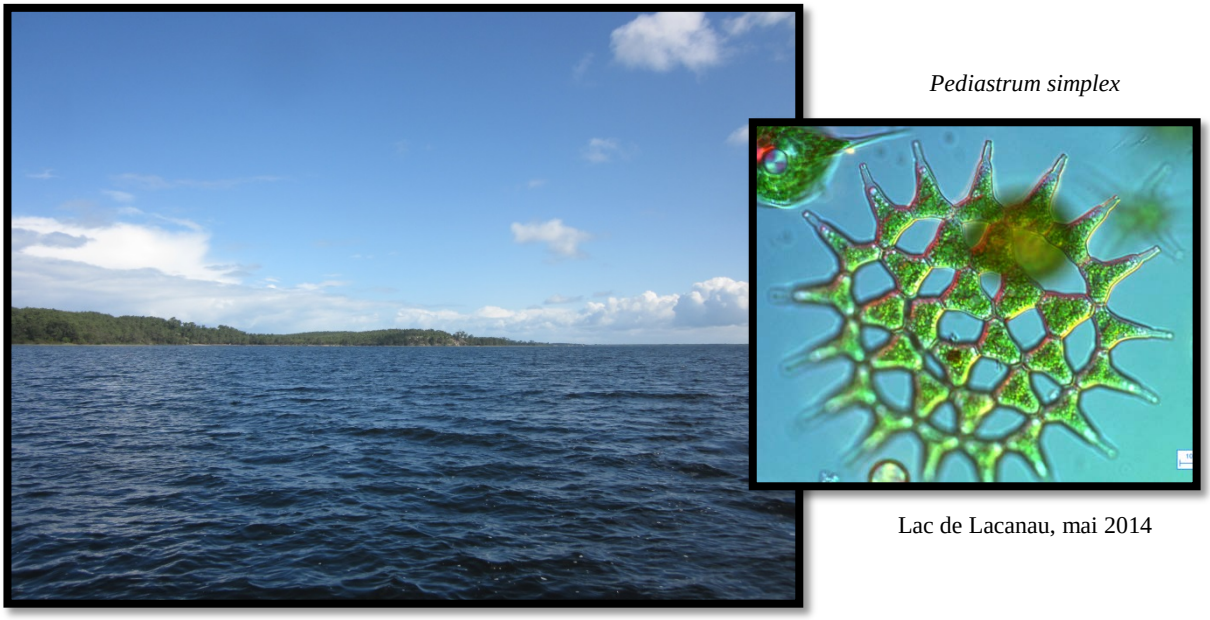
Spécialité MSc IMACOF

UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont
37200 TOURS, FRANCE
imacof@univ-tours.fr
www polytech univ-tours fr

Rapport de stage de fin d'étude 2014

Caractérisation des traits morpho-fonctionnels des communautés phytoplanctoniques des grands lacs du littoral aquitain

Stage du 12 Mars au 31 Août 2014



Pediastrum simplex

Lac de Lacanau, mai 2014

Emilie Prévost
Promotion 2013-2014

Tuteur académique :
Sabine GREULICH
Catherine BOISNEAU
Isabelle PAROT

Sous la direction de M. Christophe Laplace-Treyture

Irstea Bordeaux
Unité de Recherche Écosystèmes Aquatiques et Changements globaux **(EABX)**
Équipe **CARMA** (*Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques*)

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier Christophe Laplace-Treyture de m'avoir fait confiance pour la réussite de la mission qui m'a été confiée. Certes, nous avons dû être patients et rigoureux afin de cibler l'objectif mais l'important est que l'on ait abouti à quelque chose. La recherche est parfois imprévisible …
Je le remercie également de m'avoir initiée à l'identification du phytoplancton.

Merci à toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de mon stage.
Tout particulièrement, je remercie les aides (nécessaires) en statistiques et particulièrement Aurélien Jamoneau sans qui je n'y serais certainement pas arrivée.

Je souhaite remercier Gwilherm Jan et Jean-Claude Grégoire pour les excellentes et enrichissantes journées de terrain. Mais aussi Julien Chabanne pour toutes les discussions que nous avons partagées.

Une grande pensée aux autres stagiaires (Joséphine, Julie, Elena, Greta et Florian) et aux collègues qui ont fait de ce stage une bonne expérience de vie. Une phrase sera à retenir de tous ces bons moments : « le phyto c'est la vie » !

Enfin, ces années d'études ne peuvent se terminer sans témoigner ma reconnaissance à ma famille pour leurs encouragements et leur soutien. Mais également, je tiens à remercier les relecteurs qui se reconnaitront !

Résumé

L'étude et le suivi du phytoplancton est devenu un enjeu primordiale dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau. C'est pourquoi Irstea a mis en place un suivi mensuel sur quatre grand lacs du littoral aquitain, les lacs de de Parentis-Biscarrosse, de Cazaux-Sanguinet, d'Hourtin-Carcans et celui de Lacanau. Afin de mieux comprendre les successions saisonnières et pourquoi certaines espèces se développent plus que d'autres, les traits morpho-fonctionnels du phytoplancton ont été répertoriés puis analysés. Ainsi, 6 campagnes de mesures ont été entreprises pour chaque lac afin d'y dénombrer le phytoplancton et de réaliser des analyses physico-chimiques (phosphore, azote, etc.). 28 traits relatifs à la morphologie et aux modes de vie de l'espèce ont été renseignés et corrélés avec les biomasses algales. Au vu des résultats de l'Analyse Multidimensionnelle Non Métrique, les quatre lacs semblent posséder des traits morpho-fonctionnels bien distincts malgré une base commune. On a pu observer une séparation nette entre les communautés des lacs de Parentis-Biscarrosse et d'Hourtin-Carcans, alors que les lacs de Lacanau et de Cazaux-Sanguinet semblent plus proches. Parentis-Biscarrosse qui est un lac riche en nutriment, caractérisé principalement par des traits discriminant les cyanobactéries (akinètes et la fixation de l'azote atmosphérique) et dans un second temps les diatomées avec les squelettes siliceux. Hourtin-Carcans est globalement composé de petites espèces possédant du mucilage et est très bien représenté par les chlorophycées et les desmidiées, dans un environnement humique. Le lac de Lacanau possède la plus grande richesse algale et les principaux traits sont les protubérances, des biovolumes importants et des espèces mixotrophes. Cazaux-Sanguinet, lac oligo-mésotrophe, est moins distinctif au niveau de ces traits spécifiques avec tout de même un grand nombre d'espèces flagellées et appartenant au nanophytoplancton. Les traits sont fortement reliés aux périodes de l'étude et de ce fait, aux variations environnementales. Ils peuvent permettre de comprendre le fonctionnement d'un écosystème et comprendre le succès ou la disparition de certains taxons.

Mots clés : lacs aquitains, phytoplancton, traits, morphologie, fonctionnalités, état trophique

Abstract

Study and monitoring of phytoplankton has become a major issue in the context of the Water Framework Directive. Therefore, Irstea implemented monthly monitoring in four large lakes of the Aquitaine coast (Lakes of Parentis-Biscarrosse, Cazaux-Sanguinet Hourtin-Carcans and Lacanau). To understand the seasonal succession of phytoplankton and why some species develops more than others, the morpho-functional traits were identified and analyzed. Six seasonally samples for each lake was used to count phytoplankton and measure physicochemical parameters (phosphorus, nitrogen, etc.). 28 traits related to morphology and lifestyle of the species have been found and correlated with algal biomass. Given the results of the Non-Metric Multidimensional Scaling, four lakes appear to possess distinct traits but have also a common base. There has been a clear separation between the algal communities of lakes Parentis-Biscarrosse and Hourtin-Carcans, while the lakes of Lacanau and Cazaux-Sanguinet appear closer. Parentis-Biscarrosse is mainly characterized by traits specific of cyanobacteria with akinetes and capability of N-fixation and also with the siliceous diatom skeletons. Hourtin-Carcans, humic lake, is generally composed of small species with mucilage and is well represented by green algae and desmids. Lacanau has the largest algal richness and the main features are the protuberances, significant biovolumes and mixotrophic species. Cazaux-Sanguinet, oligo-mesotrophic lake, is less distinctive in these specific traits with still many flagellate species belonging to nanophytoplankton class. Field are strongly related to the periods of the study and thus to environmental variations. Morpho-functional traits can help to understand the functioning of an ecosystem and understand the success or disappearance of some taxa.

Keywords : aquitains' lakes, phytoplankton, traits, morphology, functional, trophic state

Préambule

Les espèces du phytoplancton sont des microorganismes eucaryotes (ou procaryotes pour les cyanobactéries) réalisant la photosynthèse grâce aux chlorophylles présentes mais également grâce aux autres pigments (xanthophylles, etc.). Elles sont principalement retrouvées en suspension dans la zone euphotique des eaux douces, saumâtres ou salées. Le phytoplancton possède un rôle majeur dans le bon fonctionnement des écosystèmes. En effet, il est le premier producteur primaire dans la plupart des écosystèmes aquatiques et se retrouve à la base de presque tous les réseaux trophiques ce qui en fait un élément important dans les procédés écologiques et biogéochimiques.

C'est donc pour cela que les études pour comprendre les successions du phytoplancton se sont développées. Elles permettent notamment de mieux comprendre le fonctionnement les masses d'eau. De plus, depuis 2007, la Directive Cadre sur l'Eau a instauré une obligation de suivi des masses d'eau de 50 hectares et plus, ainsi, sur les 4 000 lacs identifiés dans le Sud-Ouest, 107 sont cataloguées comme-t-elle. Les lacs de Parentis-Biscarrosse, de Cazaux-Sanguinet, d'Hourtin-Carcans et de Lacanau, de la présente étude font partis de cette catégorie de lacs sous surveillance. Ainsi, le suivi des lacs d'Hourtin-Carcans et de Lacanau a lieu depuis 2013 de façon mensuel et depuis 2010 pour Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet. Ces quatre lacs font partis des plus grands lacs français (le plus grand lac entièrement français étant celui d'Hourtin-Carcans). Ils se sont créés durant l'holocène (-10 000 ans) à partir de l'édification d'un cordon dunaire naturel bordant l'océan atlantique et ont été modifiés par le temps et par les actions humaines avec notamment la création de canaux reliant les lacs d'Hourtin-Carcans et de Lacanau (se situant au nord du Bassin d'Arcachon) et les lacs de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet (se situant au sud du Bassin d'Arcachon). Ces lacs possèdent des conditions climatiques similaires du fait de leur localisation proche les uns des autres.mais la profondeur maximale des lacs, le type de mélange et le niveau trophique varient. En effet, les lacs du nord sont des lacs peu profonds ; la profondeur maximale d'Hourtin-Carcans est de 11 mètres et de 8 mètres pour Lacanau. Ils sont considérés comme des lacs polymictiques c'est-à-dire qu'ils connaissent une stratification thermique estivale instable. En termes d'état trophique ils sont tous les deux considérés comme des lacs méso-eutrophe selon le classement établi par l'O.C.D.E. de 1982. En ce qui concerne les deux lacs du sud, ils sont plus profonds. Le lac de Parentis-Biscarrosse a une profondeur maximale de 20,5 mètres et celui de Cazaux-Sanguinet de 23 mètres. Ils sont considérés comme des lacs monomictiques, et ne se mélange totalement qu'une fois par an. Le lac de Parentis-Biscarosse possède le plus mauvais état trophique puisqu'il est considéré comme eutrophe. A contrario, le lac de Cazaux-Sanguinet, dont les eaux se jettent en parties dans le lac de Parentis-Biscarrosse, est considéré comme oligo-mésotrophe. Ce qui en fait une ressource d'eau potable pour les communes avoisinantes. Les différences notables entre ces lacs ainsi que la surface importante qu'ils occupent dans la région en font des lacs intéressants pour les études de diversité et de bon fonctionnement écologique.

En 2014, une nouvelle problématique a vu le jour. Il s'agit de définir les traits morpho-fonctionnels caractérisant les espèces du phytoplancton des lacs aquitains. En effet, cette méthode qui a en partie vu le jour en 1980 par Reynolds *et al.*, connait aujourd'hui un engouement important dans le monde scientifique car ces traits sont liés aux conditions de vie des taxons. Ainsi des relations semblent s'établir entre la présence de certains traits (la présence de protubérances, de flagelles, la possibilité de produire des toxines, etc.) et la croissance, la résistance, la dominance, ou la diminution de certains taxons. Dans cette étude, un point d'honneur a été mis sur la diversité des traits morpho-fonctionnels que l'on peut mettre en évidence. Le but n'a pas été de déterminer des groupes comme c'est le cas dans les études actuellement menées par les scientifiques (Reynolds *et al.*, 2002, Padisák *et al.*, (2009), Weithoff *et al.*, (2003), Kruk *et al.*, (2010), Kruk *et al.*, (2012)), mais de définir des traits spécifiques aux taxons des quatre lacs aquitains en fonction des paramètres environnementaux et chimiques agissant sur le milieu.

La notion de traits fonctionnels est apparue régulièrement dans la littérature chez les espèces végétales dans un premier temps. Les études régulières sur le phytoplancton sont récentes. Ainsi, Violle *et al.*, (2007), définit les traits fonctionnels comme étant « des paramètres morphologiques, physiologiques ou phénologiques*, mesurés au niveau de l'individu, qui influencent sa performance dans l'écosystème ». De plus, les conclusions de ces études permettent largement de comprendre les évolutions où l'intérêt pour la plante de posséder certains paramètres physiques et morphologiques.
Dans notre étude liée au phytoplancton, 75 traits ont été identifiés dans un premier temps. Finalement, 28 traits ont été conservés. De manière nominatives seulement, ces traits sont : la forme de vie (cellule, colonie ou filament), le biovolume (classes : <10 μm^3, 10,1-100 μm^3, 100,1-1 000μm^3, 1 000,1-10 000μm^3, >10 000μm^3), la taille que l'individu peut atteindre au maximum (picophytoplancton : 0,2–2µm, nanophytoplancton : 2–20µm, microphytoplancton : 20–200 m, mésophytoplancton : 200µm–2mm, macrophytoplancton : >2mm), la forme « géométrique » (sphère, cymbelloïde, cylindre, cylindre ovale, ellipse rotationnelle, ellipse plate, ellipse, forme de *Ceratium*, forme de *Staurastrum*, double cône, parallélépipède, prisme sur une base de parallélogramme, prisme sur une base de triangle, cône avec demi-sphère), la motilité, la présence de flagelles, aérotopes, mucilage et vacuoles contractiles, la présence de cellules spécialisées (akinète), la capacité de fixer l'azote atmosphérique, la possibilité de produire des toxines, la mixotrophie, la présence ou non de certains pigments (chlorophylles *b* et *c*, xanthophylles, phycobilines), la présence de chloroplaste, la présence de gaine, ou de squelette siliceux, de lorica, de plaques durs ou d'écailles siliceuses, la présence d'ornementation (ponctuation, etc.) sur la paroi et donc si la paroi est lisse ou non, la présence de tractus (lien solide qui relie les cellules d'une colonie ensembles), la présence de protubérance (épines, etc.), le mode de reproduction. Ces traits, tout comme les taxons identifiés lors du comptage, ont été analysé statistiquement à l'aide du logiciel R. Une Analyse

Multidimensionnelle Non Métrique (NMDS) a été réalisée car c'est souvent la méthode choisie pour représenter graphiquement les relations entre les communautés (Clarke, 1993).

La structuration de la communauté a d'abord été analysée (Figure 1). Parentis-Biscarrosse est principalement caractérisé par des cyanobactéries. Le lac de Cazaux-Sanguinet connait une variabilité en termes de groupes algaux avec cependant une dominance au cours des mois par les dinophycées. Le lac d'Hourtin-Carcans voit apparaître une dominance des chlorophycées et le lac de Lacanau est proche du lac de Cazaux-Sanguinet en termes de succession phytoplanctonique avec une légère dominance des chlorophycées. On a ainsi dénombré 265 espèces au total. Cependant, lors du comptage, certains taxons n'ont pas pu être identifiés (absence des critères nécessaires à l'identification). Ainsi, dans les tests statistiques, elles n'ont pas été prises en compte, et cette richesse a été réduite à 241 taxons. Le détail de la richesse taxinomique a montré que le lac de Lacanau possédait le plus de taxon différents avec 133 espèces différentes, alors que Parentis-Biscarrosse en possède 115, Hourtin-Carcans, 114 et Cazaux-Sanguinet, 110.

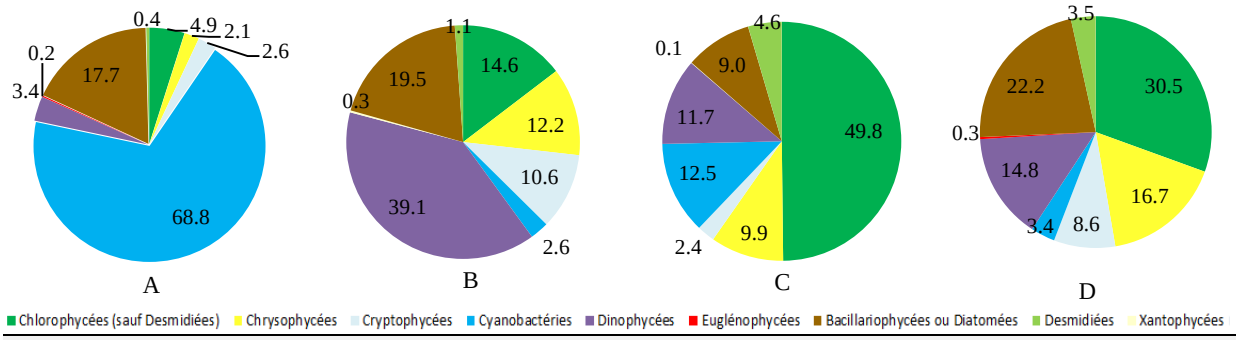


Figure 1 : Représentation en pourcentage de la biomasse des grands groupes algaux pour chaque lac durant la période d'étude (janvier à juin 2014). A : Parentis-Biscarrosse, B : Cazaux-Sanguinet, C : Hourtin-Carcans, D : Lacanau

Les premiers résultats de l'analyse des traits morpho-fonctionnels montrent une base de traits commune à tous les lacs. En effet, La majorité des individus est retrouvé sous forme de cellule et de colonie. La forme prédominante est l'ellipse rotationnelle. On peut même observer une augmentation légère de ces formes en mai et juin, ce qui s'explique par l'augmentation de la biomasse algale et du nombre d'individus durant cette période. De plus, les cellules possédant un biovolume compris entre 100 et 1 000 µm sont les plus fréquemment retrouvées. Les traits permettant la protection de la cellule sont les gaines, le mucilage, les lorica, les plaques et les écailles siliceuses. Ils sont présents sur tous les lacs, le tout dépend de certains paramètres environnementaux ou chimiques. Le trait « production de toxines », par les cyanobactéries est particulièrement intéressant à étudier car les toxines produites sont dangereuses pour l'homme. Les efflorescences sont par ailleurs très surveillées sur Parentis-Biscarrosse car comme les résultats des analyses l'ont démontré, la capacité de produire des toxines est très présente sur ce lac et est dominante par rapport aux autres lacs. Ainsi, sur les quatre lacs, 13 espèces différentes ont été répertoriés comme libérant des toxines dans l'eau. Le lac de Parentis-Biscarrosse en possède le plus grand nombre avec 9 espèces différentes, dont *Aphanizomenon*

gracile. Cette dernière participe activement à la biomasse totale de la campagne du mois de mars, avril et mai (respectivement 13, 89 et 29 %), puis en mai et juin, l'espèce *Planktothrix agardhii* prend plus d'ampleur avec des biomasses de 36 et 47 %.

En analysant les traits de chaque lacs en fonction des mois de campagne et des données environnementale, on a pu observer des différences.
L'étude de la biomasse algale a mis en évidence que les espèces du lac de Parentis-Biscarrosse étaient plus abondantes que dans les autres lacs. Ceci s'explique en partie par la présence de nombreuses colonies et filaments (traits majeurs dans l'évitement du broutage zooplanctonique), et au développement important des cyanobactéries. Le lac de Cazaux-Sanguinet, possède la plus basse richesse taxinomique et biomasse totale. Ceci s'explique par son bon état de trophie, malgré la présence des nutriments dans l'eau qui augmente d'année en année. Les traits le caractérisant sont donc moins facilement discriminants car la communauté est variable au cours des mois et saisons. On peut, cependant, remarquer que les espèces présentes sont souvent flagellées de forme ellipsoïde, la mixotrophie est importante et il la taille des espèces est variable (allant du nano au macrophytoplancton). Ce qui correspond bien au lac puisqu'il est très transparent et possédant une stratification thermique estivale. Le lac d'Hourtin-Carcans est fortement corrélé à des espèces de chlorophycées, de desmidiées et d'euglénophycées à cause du pigment de chlorophylle *b*. Mais également avec des formes relativement petites, où le mucilage prend une place importante. Cela signifie que la prédation doit être importante car les petites cellules sont plus souvent vulnérables à la prédation. Cependant, la présence de mucilage est un avantage pour résister au broutage, mais il peut aussi avoir l'effet inverse, car plus visible qu'une cellule solitaire ce qui peut dans un sens augmenter les risques de prédation (Beardall *et al.,* 2008). La présence de mucilage permet également de stocker les nutriments et ainsi d'être moins affecté par les variations de ceux-ci. Le lac de Lacanau possède la plus forte richesse en termes de taxon. Cette richesse est en partie due aux nutriments toujours présents et à un mélange presque constant. Malgré cet apport beaucoup d'espèces pratiquent la mixotrophie, ce qui confère un avantage dans toute la colonne d'eau. Également, la présence de protubérance sur des espèces de ce lac laisse penser que la prédation y est importante.

Cette étude a permis de mettre en évidence que, malgré des conditions hydromorphologiques différentes, les lacs possèdent des communautés relativement similaire mais ne suivant pas la même tendance. Ainsi, certains traits morpho-fonctionnels ont pu être mis en évidence. Actuellement, il serait intéressant de comparer ces premiers résultats à des méthodes empirique (Sommer *et al.,* 1986), ou à des méthodes d'ordination en groupes fonctionnels (Reynolds *et al.,* 2002).

Table des matières

Table des abréviations 3

Introduction 4

1 Présentation de la structure d'accueil et des objectifs du stage 5

1.1 Irstea de Bordeaux 5

1.2 Présentation du contexte du stage 6

2 Généralités 7

2.1 Généralités sur le phytoplancton 7

2.2 Présentation des plans d'eau 9

2.2.1 Parentis-Biscarrosse 10

2.2.2 Cazaux-Sanguinet 10

2.2.3 Hourtin-Carcans 10

2.2.4 Lacanau 11

3 Matériels et méthodes 12

3.1 Fréquence des campagnes de mesure 12

3.2 Facteurs abiotiques 12

3.3 Facteurs biotiques 13

3.4 Traitement statistique 13

4 Détermination des traits morpho-fonctionnels 15

4.1 Le contexte européen 15

4.2 Les recherches bibliographiques 19

4.3 Méthode employée pour l'étude 23

5 Résultats 27

5.1 La structure de la communauté phytoplanctonique 27

5.1.1 Observation de la communauté phytoplanctonique avec les tests statistiques..... 30
5.2 Analyse des traits morpho-fonctionnels des espèces du phytoplancton des quatre lacs aquitains 35

6 Discussion 41
6.1 La communauté phytoplanctonique..... 41
6.2 Les traits morpho-fonctionnels..... 44
6.3 Ouverture..... 49

Conclusion..... 50

Bibliographie..... 51

Liste des figures 54
Liste des tableaux..... 55
Liste des annexes..... 56

Glossaire..... 78

Table des abréviations

ACC	Analyse Canonique des Correspondances
ACP	Analyse en Composantes Principales
CAH	Classifications ascendantes Hiérarchiques
CARMA	Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques
Cemagref	Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et forêts
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
EABX	Écosystèmes Aquatiques et Changements globaux
EPST	Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique
ETBX	Environnement, Territoires et infrastructures
FD	Functional Diversity (diversité fonctionnelle) (Weithoff, 2003)
Irstea	Institut National de Recherches en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
MBFC	Morphologically Based Functional Classification
MBFG	Morphologically Based Functional Groups
MES	Matières en suspensions
MFG	Morpho-Functional groups (Groupes Morpho-Fonctionnels)
NMDS	Non-Metric Multidimensional Scaling (Analyse Multidimensionnelle Non Métrique)
PEG	Plankton Ecology Group
S.A.G.E	Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
SIE Adour-Garonne	Système d'Information sur l'Eau Adour-Garonne

Introduction

Le phytoplancton fait partie des producteurs primaires essentiels pour la compréhension et la qualification des milieux aquatiques, et est aujourd'hui l'un des indicateurs biotiques les plus utilisés afin de caractériser l'état d'une masse d'eau. Depuis 2007 et dans le cadre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE du 23 octobre 2000 (directive 2000/60)), l'Etat a obligation du suivi des plans d'eau de plus de 50 ha. Ainsi, les actions se sont développées sur tout le territoire afin de caractériser ces masses d'eau et d'assurer leur protection et la surveillance de la qualité de l'eau. Ainsi, afin d'aider à comprendre les changements dans la composition du phytoplancton, la caractérisation des traits morpho-fonctionnels s'est développée. Cet engouement autour de ces traits tient du fait qu'ils sont fortement reliés au cycle de vie des espèces et qu'ils déterminent, suivant les conditions environnementales, la résistance, la dominance ou la diminution de certains taxons.
Le but de cette étude est donc de déterminer les traits morphologiques et fonctionnels spécifiques du phytoplancton des lacs aquitains et de définir les relations avec les paramètres environnementaux et chimiques. En effet, une étude systématique des traits caractéristiques du phytoplancton a le potentiel d'expliquer la diversité des espèces tout en permettant de comprendre la manière dont les communautés sont structurées et pourraient être structurées dans le futur. Mais, la construction d'un classement général est souvent dépendant des caractéristiques biologiques et environnementales locales. Ainsi, l'identification des traits des espèces dans ce présent rapport est spécifique aux lacs aquitains.
Nous verrons dans le volet européen, d'autres méthodes employées et décrites par des scientifiques étrangers permettant de définir des groupes fonctionnels ou morpho-fonctionnels du phytoplancton et appliquées sur d'autres types de lacs dans l'Europe.

Ainsi, dans un premier temps, la structure d'accueil ainsi que les objectifs du projet seront définis. Puis une partie sur les généralités liées au phytoplancton et à la présentation des lacs sera réalisée. Le matériel et les méthodes, dont celles utilisées pour déterminer les traits, seront expliqués. Enfin, les résultats seront analysés et interprétés dans la partie suivante.

1 Présentation de la structure d'accueil et des objectifs du stage

1.1 Irstea de Bordeaux

Irstea (Institut National de Recherches en Sciences et Technologies pour l'environnement et l'agriculture - Figure 1) de Bordeaux fait partie d'un réseau de 9 établissements répartis sur toute la France. C'est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) qui a été créé en 1981 sous le nom de Cemagref (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et forêts) pour ensuite évoluer en 2012 et devenir Irstea. Il regroupe un ensemble d'ingénieur, de chercheurs, doctorants et techniciens. Les centres possèdent plusieurs vocations et domaines de recherches qui leur sont propre.

Figure 1 : logo d'Irstea _ source: Irstea.fr

Irstea de Bordeaux est localisé sur le site de Cestas-Gazinet. Les activités de recherche, d'appui aux politiques publiques et d'expertise portent sur 2 domaines principaux : la gestion de l'eau et du fonctionnement des milieux aquatiques et l'interface entre eau et gestion des territoires. Il y a pour cela, deux unités de recherche :

- Écosystèmes aquatiques et changements globaux (EABX)
- Environnement, territoires et infrastructures (ETBX)

Figure 2 : logo de l'équipe Carma. Source : Irstea

J'ai effectué mon stage de Master 2, au sein de l'Unité de recherche EABX (Écosystèmes Aquatiques et Changements globaux) et plus particulièrement, j'ai intégré l'équipe CARMA (Contaminants Anthropiques et Réponses des Milieux Aquatiques - Figure 2). Son axe principal de recherche vise à caractériser le fonctionnement des écosystèmes aquatiques en identifiant les menaces, souvent anthropiques. Une forte orientation sur l'étude des végétaux aquatiques (phytoplancton, diatomées, macrophytes) est observée. Ainsi, les problématiques de ces études abordent, entre autre, le rôle fonctionnel des organismes dans l'environnement et le développement d'indices pour la bioindication.

1.2 Présentation du contexte du stage

Mon stage s'est déroulé sous la tutelle de Christophe Laplace-Treyture, ingénieur d'étude hydrobiologiste, chargé de l'étude du phytoplancton. Mon rôle a été de caractériser les traits morpho-fonctionnels du phytoplancton des lacs aquitains. De ce fait, j'ai pu participer aux campagnes de mesures permettant l'échantillonnage du phytoplancton, pour ensuite, grâce à ces données, analyser la variabilité spatiale des communautés phytoplanctoniques et les éventuelles adaptations de ces communautés. Mon objectif principal était de déterminer les traits importants caractérisant ces populations. Ces traits, principalement morphologiques ont été répertoriés sous la forme d'un « catalogue » pour chaque taxon. Ces données ont été par la suite, corrélées aux paramètres environnementaux susceptibles d'influencer l'apparition et la succession des espèces du phytoplancton au cours de l'année 2014. Le but est également de définir, pour notre population, la corrélation de ces traits avec les facteurs biotiques et abiotiques.

Cette étude entre dans un programme annuel avec l'agence de l'eau Adour-Garonne, visant à mieux caractériser et mieux comprendre le fonctionnement des quatre grands systèmes lacustres aquitains. Ce programme est mis en place depuis début 2013 et étudie la physico-chimie des eaux, des sédiments et le phytoplancton.

2 Généralités

2.1 Généralités sur le phytoplancton

On regroupe sous le terme de phytoplancton, l'ensemble des algues qui vivent en suspension dans l'eau. Leur développement, leur succession et leur régulation au cours du temps sont contrôlés par différents paramètres environnementaux comprenant les facteurs biotiques et abiotiques. En effet, le rôle des nutriments (azote et phosphore principalement) et de la lumière n'est plus a démontré pour la croissance algale. Le broutage est un facteur important dans la régulation du phytoplancton, mais il est difficilement quantifiable dans la réalité. Il en est de même pour la compétition entre les différentes espèces du phytoplancton. Les paramètres physiques environnementaux tels que les conditions hydrauliques, le vent, la température, conditionnent également le développement algal.

De manière générale, les communautés du phytoplancton dominent les écosystèmes pélagiques qui couvrent près de 70% de la surface du monde (Reynolds, 2006). Elles se situent cependant, principalement et majoritairement en suspension dans la zone euphotique des océans, mers, lacs et rivières. Ce sont les premiers producteurs primaires dans la plupart des écosystèmes aquatiques, représentant près de la moitié de la production primaire globale nette (Field *et al.*, 1998), soit environ 40% de la production primaire annuelle (Chisholm, 1995). De plus, le phytoplancton joue un rôle essentiel dans les processus écologiques et biogéochimiques des écosystèmes aquatiques marins et d'eau douce (Reynolds, 2006), et se situe à la base de presque tous les réseaux trophiques dans les écosystèmes aquatiques.

La classification des espèces du phytoplancton se fait dans un premier temps sur la base des pigments photosynthétiques (chlorophylle *a*, xanthophylles, etc.), des produits de réserve (amidon, lipides, etc.) et de leur localisation ainsi que sur le niveau de complexité cellulaire et intracellulaire. Ces critères, couplés à d'autres comme le mode de reproduction et la mobilité par exemple, permettent de classer le phytoplancton dans des classes.
Dans notre étude, sur les quatre lacs étudiés, on a dénombré 18 classes regroupant pas moins de 265 espèces du phytoplancton et séparées en 9 groupes algaux. Parmi ces groupes on distingue les cyanobactéries et les chlorophycées qui se trouvent être les deux plus importantes classes. Les différents groupes algaux sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : code couleur et description des différents groupes algaux. Source : Rolland (2009), Cellamare (2009), Druart (2009), De Reviers (2003), John *et al.*, (2011)

Chlorophycées (sauf Desmidiées) ou algues vertes		Organismes eucaryotes. Ces algues sont retrouvées sous forme unicellulaires, coloniales, filamenteuses, cénobiales. Certains taxons possèdent des flagelles. La reproduction peut être asexuée ou sexuée. Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les chlorophylles *a*, *b* et des xanthophylles.

Chrysophycées ou algues dorées		Organismes eucaryotes. Ce sont des algues unicellulaires ou coloniales (rarement filamenteuses). La plupart possèdent une enveloppe protectrice appelée lorica*. Certains taxons possèdent des flagelles (1 ou 2). La reproduction peut être asexuée ou sexuée. Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les chlorophylles *a*, *c1*, *c2* et les xanthophylles.
Cryptophycées		Organismes eucaryotes. Ce sont des algues unicellulaires, mobiles car présence de deux flagelles et dépourvue de renforcement de la paroi cellulaire. Une vacuole contractile* est parfois présente. La reproduction peut être asexuée ou sexuée, mais elle est principalement asexuée (fission binaire). Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les chlorophylles *a*, et *c2* et des phycobilines.
Cyanobactéries ou algues bleues		Organismes procaryotes. Les cellules se caractérisent par l'absence de noyau, de chloroplastes et n'utilise que la reproduction asexuée. Ces algues peuvent être retrouvées sous forme solitaire, coloniale ou filamenteuse. Certaines possèdent des cellules spécialisées comme des vacuoles de gaz leur permettant de réguler leur position dans la colonne d'eau. Mais aussi la présence d'akinètes* et d'hétérocystes[1]* chez certains filaments. Toxicité de certaines espèces posant des problèmes de santé publique. Les pigments sont la chlorophylle *a* et des phycobilines.
Dinophycées ou dinoflagellées		Organismes eucaryotes. Ce sont des algues unicellulaires, flagellées et mobiles. La paroi cellulaire est renforcée par des plaques de cellulose entourant toute la cellule. La reproduction peut être asexuée ou sexuée, mais la reproduction asexuée domine la plupart du temps. Présence de plusieurs chloroplastes (>2) et caractérisées par les chlorophylles *a*, et *c2* et des xanthophylles. Il y a peu d'espèces dans ce groupe (environ 300).
Euglénophycées		Organismes eucaryotes. Ce sont des algues unicellulaires, rarement coloniales, flagellées et mobiles. La paroi cellulaire est renforcée par des plaques de cellulose entourant toute la cellule pour la majorité des espèces de ce groupe. Une vacuole contractile* est parfois présente. Le genre *Trachelomonas* est entouré d'une thèque rigide (sorte de lorica*). La reproduction est principalement asexuée par division cellulaire. Présence de plusieurs chloroplastes (>2) et caractérisées par les chlorophylles *a*, et *b* et des xanthophylles.
Xanthophycées		Organismes eucaryotes. Ce sont des algues unicellulaires, coloniales, ou filamenteuses. Elles peuvent être flagellées. La reproduction peut être asexuée ou sexuée. Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les pigments de chlorophylle *a*, et *c* et des xanthophylles.
Bacillariophycées ou Diatomées		C'est un grand groupe algal qui regrouperait plus de 100 000 espèces. Organismes eucaryotes. Leur caractéristique principale est la présence d'une paroi cellulaire siliceuse renforcée appelée frustule. Elles peuvent être unicellulaires, coloniales ou filamenteuses. Les deux principales morphologies sont les pennées (symétrie bilatérale) ou les centrique (symétrie radiale). La reproduction peut être asexuée ou sexuée. Mais le mode le plus commun est la division cellulaire. Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les chlorophylles *a*, *c1*, *c2* et *c3* et des xanthophylles.
Desmidiées		Les espèces appartenant à ce genre sont en réalité une sous-partie des algues vertes et comprend environ 6 000 espèces. La morphologie des cellules présente une constriction au milieu de la cellule qui représente le point de réunion entre les deux valves jumelles. Le moyen de reproduction le plus courant est la reproduction sexuée. Présence d'un ou plusieurs chloroplastes et caractérisées par les chlorophylles *a*, *b* et les xanthophylles.

Le phytoplancton est donc extrêmement varié et représenté par des tailles et formes très différentes (Hillebrand *et al.*, 1999). Cette diversité tant du point de vue morphologique que

[1] * : Voir la définition dans le glossaire à la fin de ce rapport

physiologique est en relation directe avec les autres facteurs agissant sur le milieu. La littérature a déjà mis en évidence un grands nombre de relation, notamment grâce à la taille des espèces. C'est donc dans ce contexte que l'on essaiera de trouver les relations entre les espèces du phytoplancton et les facteurs environnementaux.

2.2 Présentation des plans d'eau

Les plans d'eau étudiés se situent dans le bassin hydrographique Adour-Garonne qui caractérise le grand Sud-Ouest de la France (Figure 3). Depuis 2007, la DCE a instauré une obligation de suivi des masses d'eau de 50 ha et plus, ainsi, sur les 4 000 lacs identifiés dans le Sud-Ouest, 107 sont catalogués comme étant des masses d'eau soumises à obligation de suivi. Le bassin hydrographique Adour-Garonne regroupe 25 % des masses d'eau française.

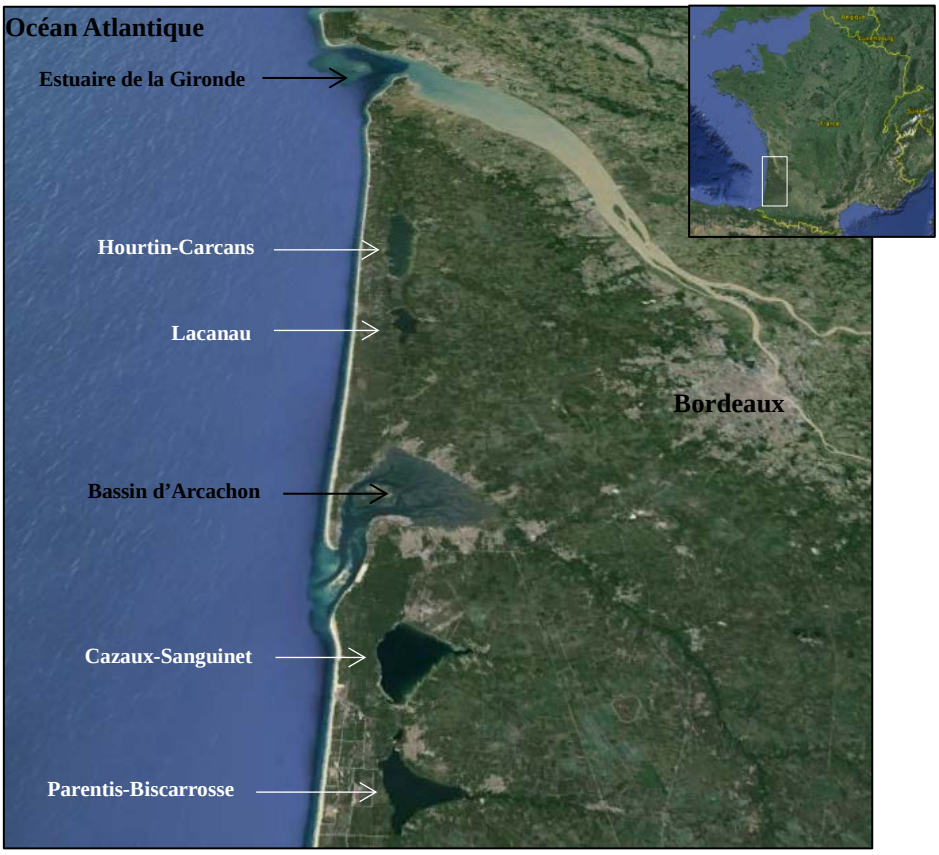


Figure 3 : localisation géographique des quatre plans d'eau aquitains. Source : Google Earth

Les quatre lacs étudiés se sont créés grâce à l'édification d'un cordon dunaire bordant l'océan durant l'holocène (-10 000 ans) à partir des ruisseaux, des cours d'eau et précipitations. Plus actuellement, les actions humaines, notamment le creusement des canaux reliant les lacs qui permettent de diminuer les risques d'inondation, ont modifiées considérablement la morphologie des quatre lacs aquitains.

Ils possèdent globalement des conditions climatiques similaires et ils se situent à basse altitude, mais ils varient considérablement au niveau du type de mélange du lac (monomictique et polymictique), au niveau de la profondeur du lac (notamment la profondeur maximale) mais également au niveau de l'état trophique actuel (Tableau 2, annexes 1, 2, 3, 4).

Tableau 2 : caractéristiques générales des lacs du littoral aquitains. Source : Cellamare (2009), Gogin (2013)

Lac	Superficie	Profondeur max	Volume	Taux de renouvellement annuel
Parentis-Biscarrosse	35,4 km²	20,5 m	250 millions de m^3	1,02
Cazaux-Sanguinet	48 km²	23 m	500 millions de m^3	0,23
Hourtin-Carcans	62 km²	11 m	210 millions de m^3	0,56
Lacanau	20 km²	8 m	53 millions de m^3	2,34

De plus, ils sont tous caractérisés par un fort développement des activités de loisirs avec principalement, la pêche, la chasse, les activités motonautiques et la baignade.

2.2.1 Parentis-Biscarrosse

Le lac de Parentis-Biscarrosse (Figure 4-A) se situe sur le territoire des Landes et est relié au lac de Cazaux-Sanguinet par un canal régulé. La principale caractéristique de ce lac est qu'il possède des puits de production pétrolière du groupe canadien Vermilion. Le lac présente un état trophique eutrophe (O.C.D.E., 1982), favorisant la prolifération de cyanobactéries pouvant être dangereuses pour la santé humaine à cause de la libération de toxines. Malgré ces efflorescences de plus en plus importantes, les rives sont mises en valeur afin d'attirer les activités de tourisme (camping, plages, etc. ; Géolandes, 2008).

2.2.2 Cazaux-Sanguinet

Le lac de Cazaux-Sanguinet (Figure 4-B) présente une condition géographique particulière car il se situe sur le département de la Gironde (partie Nord-Ouest) mais aussi sur le département des Landes (au sud). La principale caractéristique de ce lac est la présence d'une importante base militaire sur la rive nord du lac. Il présente un état trophique considéré comme oligo-mésotrophe, c'est-à-dire de relativement bonne qualité selon l'Agence de l'Eau (SIE Adour-Garonne) et la grille de diagnostic établie par l'O.C.D.E (1982). Ce bon état général en fait une ressource d'eau potable pour les communes environnantes.

2.2.3 Hourtin-Carcans

Le lac d'Hourtin-Carcans (Figure 4-C) se situe dans le département de la Gironde sur le plateau médocain. Il est principalement alimenté par un réseau de crastes* artificielles qui a pour but de drainer les terrains sableux traversant les forêts de pin (sylvicultures). Ainsi, de nombreuses

particules humiques arrivent dans le lac provoquant une forte turbidité (disque de Secchi compris entre 2 et 3,5 mètres, annexe 8). Ce lac est considéré comme méso-eutrophe d'après l'O.C.D.E. (1982) et les données de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (SIE Adour-Garonne).

2.2.4 Lacanau

Le lac de Lacanau (Figure 4-D) se situe également dans le département de la Gironde. Il présente une forte turbidité tout comme le lac d'Hourtin-Carcans et c'est dans ce lac que les activités touristiques et aquatiques sont les plus importantes. Le lac présente un état trophique méso-eutrophe selon l'agence de l'eau et la grille de diagnostique établie par l'O.C.D.E., (1982).

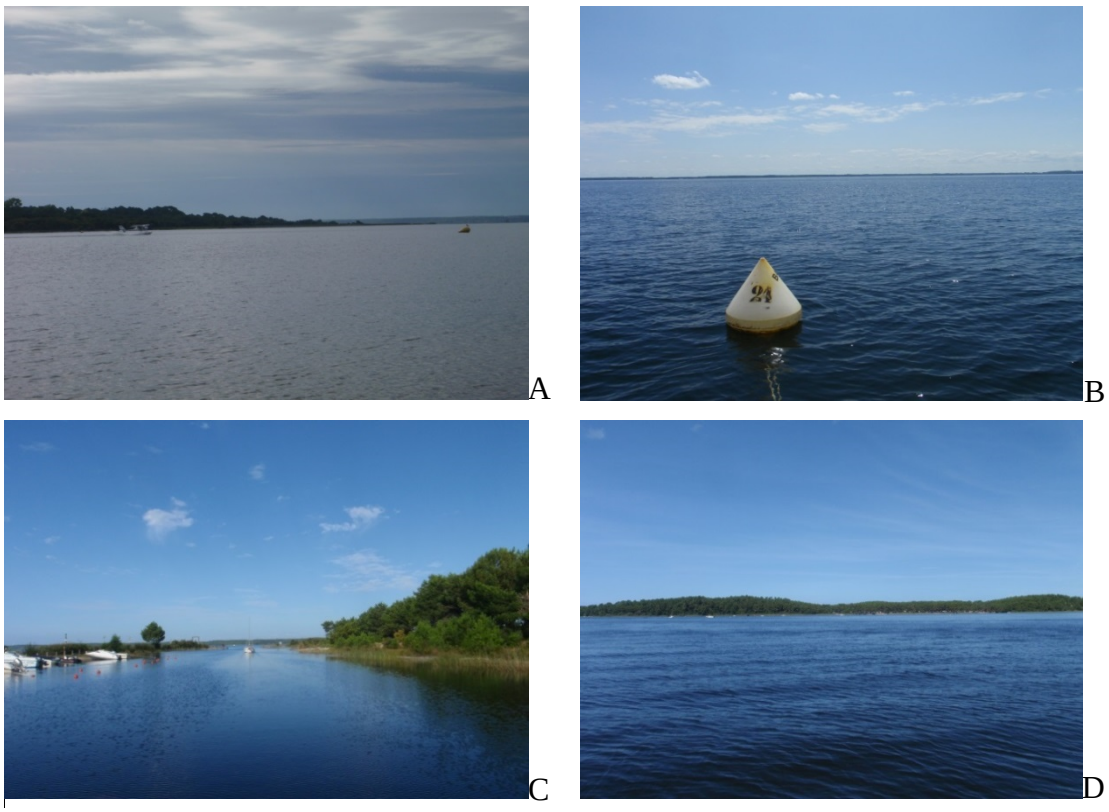


Figure 4 : photographies des quatre lacs aquitains prises en août 2014, A : Parentis-Biscarrosse ; B : Cazaux-Sanguinet ; C : Hourtin-Carcans ; D : Lacanau. Source : personnelle

Une fiche de synthèse de chaque lac a été réalisée et est présentée en annexes 1, 2, 3 et 4.

3 Matériels et méthodes

3.1 Fréquence des campagnes de mesure

Les plans d'eau d'Hourtin-Carcans, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarosse font partis des 107 lacs sous surveillance. Ainsi, afin de suivre l'évolution de leur état écologique, un suivi mensuel a été instauré, comprenant des mesures de terrain, des analyses physico-chimiques et des comptages phytoplanctoniques. Le suivi des lacs est réalisé depuis 2013 de façon mensuelle (sauf pour les lacs de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet où les prélèvements ont commencé en 2010 ; annexe 5 : détail des campagnes 2014). Dans le cadre de cette étude, seule l'année 2014 a été analysée (6 campagnes pour chaque lac). Chaque prélèvement a été réalisé au point le plus profond du lac.

3.2 Facteurs abiotiques

Au cours de chaque campagne, des caractéristiques descriptives du point de prélèvement ont été relevés : profondeur, vagues, aspect de l'eau, bloom, vent, aspect du ciel, heure de prélèvement, etc. Le disque de Secchi a été utilisé afin de déterminer la transparence de l'eau. A partir de cette valeur, la zone euphotique* est définie (Z_{eu}= 2,5 * Secchi). Ensuite, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et la température ont été mesurés sur toute la colonne d'eau à partir d'une sonde multiparamètre WTW, afin d'obtenir une représentativité sur l'ensemble de la colonne d'eau. Des échantillons d'eau intégrée ont été récupérés dans la zone euphotique à l'aide d'une bouteille de prélèvement intégratrice (Hydrobio IWS). Les prélèvements sont stockés dans des bouteilles d'un litre et serviront notamment aux analyses chimiques pour déterminer les matières en suspension (MES), la présence de silice, de phosphore (orthophosphates et phosphore total) ainsi que l'azote (total, minéral, ammoniacal et Kjeldahl) (Annexes 6, 7, 8 et 9). Afin de compléter les paramètres environnementaux, des données météorologiques ont été récupérées grâce à une convention avec Météo France. Ainsi, deux stations proches des lacs ont été sélectionnées, une à Biscarrosse pour les lacs au sud et une à Lège-Cap Ferret pour les lacs au nord (Annexe 10 et 11). Cependant, en ce qui concerne la station des lacs au nord, l'information sur le rayonnement globale n'était pas renseignée, ainsi, par défaut, la station de Mérignac a été utilisée pour ce paramètre. Les paramètres sont : la hauteur de précipitations, la température maximale et moyenne sous abri, la vitesse maximale du vent instantané et la moyenne des vitesses du vent à 10m ainsi que le rayonnement global quotidien (annexes 10 et 11)

3.3 Facteurs biotiques

Durant les phases de terrain, un spectrofluorimètre de terrain, la sonde bbe Fluoroprobe™ (Moldaenke, Kiel, Allemagne), a été utilisé. Cet appareil permet d'évaluer la biomasse présente en équivalent de chlorophylle *a* de 4 classes d'algues (diatomées, algues vertes, algues bleues-vertes et cryptophycées) en temps réel. Un litre d'eau de la zone euphotique sera utilisé en laboratoire pour la quantification de la chlorophylle *a*, *b* et *c* et des phéopigments avec la méthode de Jeffrey et Humphrey et de Lorenzen.
À chaque phase de terrain, des échantillons de 250 ml ont été recueillis dans la zone euphotique des lacs, puis directement fixés au lugol. L'analyse du phytoplancton se fait en suivant la norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscope inversé (norme NF EN 15204, 2006). Les échantillons sont placés dans des chambres de sédimentation de 10 ou 25 ml. La chambre de sédimentation est choisie en fonction du niveau trophique du lac mais aussi en fonction de la profondeur du disque de Secchi au moment de l'échantillonnage (Annexes 6, 7, 8 et 9). Le but est d'obtenir un nombre assez important d'individus sans que ceux-ci ne se chevauchent et empêchent leur identification. Dans un premier temps, le comptage se fait rapidement à un faible grossissement (X10) pour avoir une idée du peuplement et compter les gros individus, puis un comptage plus précis au grossissement X600 est réalisé sur au moins 30 champs choisis aléatoirement dans la chambre de comptage.

Irstea a développé un logiciel informatique de comptage du phytoplancton (PHYTOBS) permettant, à partir d'une base de données préalablement renseignée, le calcul de l'abondance de chaque espèce (nb obj/ml) et le biovolume (mm^3/l). Ce logiciel est conforme à la norme citée ci-dessus et respecte le protocole standardisé de la DCE sur l'échantillonnage du phytoplancton dans les plans d'eau (Laplace-Treyture *et al.*, 2009).
L'identification et le comptage des échantillons ont été réalisés par Christophe Laplace-Treyture. J'ai cependant pu observer et identifier quelques échantillons afin de me familiariser avec les espèces et ainsi mieux comprendre la succession saisonnière et les différents types de morphologies.

3.4 Traitement statistique

Des analyses statistiques ont été entreprises afin de mettre en évidence les communautés importantes de nos échantillons et les traits morphologiques les plus pertinents. Toutes ces analyses ont été effectuées avec le logiciel libre R (R Development Core Team, 2008, version 3.1.0). L'analyse descriptive des données passe par la réalisation de tests multivariés comme l'analyse multidimensionnelle non métrique (NMDS).

- Analyse Multidimensionnelle Non Métrique (NMDS : Non-Metric Multidimensional Scaling)

Cette méthode cherche à représenter dans un nombre d'axes pré-imposé et réduit, les relations d'ordre entre les objets. Le cadrage des objets est réalisé en minimisant de manière répétitive une fonction de stress et cela permet de représenter une matrice avec moins de déformations qu'avec une Analyse en Composantes Principales (ACP). Ainsi, cette analyse permet la recherche de la meilleure position de n objets sur k dimensions (axes) pour minimiser le stress résultant de la configuration à k dimensions. Cette méthode permet donc de situer les objets dans un espace de dimension réduite, qui préserve autant que possible l'échelle des distances entre eux. De cette façon, les tableaux de données doivent être des « distances » entre les individus et non des variables caractéristiques d'individus. Dans notre cas, il s'agit d'une analyse non-métrique, c'est-à-dire que les données sont ordinales (rang). Ainsi, l'analyse s'intéresse plus à l'ordre des dissimilarités plutôt qu'à leur étendue (dans le cas de l'analyse métrique la mesure des dissimilarités utilisée est une distance euclidienne). La NMDS permet l'approximation de l'ordre des entrées dans la matrice des dissimilarités par l'ordre des distances dans l'espace de dimension réduit.
On va se servir de cette analyse pour analyser les données de biomasse de chaque espèce du phytoplancton pour chaque lac à chaque date de prélèvement.

On va ainsi pouvoir observer notre matrice des communautés en fonction des paramètres physico-chimiques. De plus, il nous semblait plus cohérent de continuer avec une NMDS pour l'analyse des traits car très similaires à une analyse canonique des correspondances (CCA et on ne suspect pas de relation linaire avec les sites et les traits au départ, d'où le choix d'une NMDS. Également, cette méthode permet de s'affranchir de la normalité des données mais aussi, elle permet de connaitre la répartition des variables spatiales dans l'espace par rapport aux espèces rencontrées et en fonction des sites.

Une corrélation de Spearman (rhô de Spearman) sera réalisée pour voir quels sont les paramètres environnementaux (chimiques, physiques et météorologiques) permettant d'expliquer les gradients observés sur les axes de la NMDS réalisée sur les communautés de phytoplancton de nos lacs mais également avec les traits morpho-fonctionnels.

Au préalable une description des communautés en fonctions des grands groupes d'algues sera effectuée en regardant notamment la richesse spécifique des différents lacs.

4 Détermination des traits morpho-fonctionnels

4.1 Le contexte européen

La notion de trait fonctionnel est apparue de manière récurrente chez les espèces végétales terrestres il y a une dizaine d'années. Cette notion est parfois confuse dans la littérature et de nombreuses définitions existent selon la discipline, le niveau d'organisation ou le milieu considéré. Violle *et al.,* (2007), définit les traits fonctionnels comme étant « des paramètres morphologiques, physiologiques ou phénologiques*, mesurés au niveau de l'individu, qui influencent sa performance dans l'écosystème ». Par exemple, dans les études relatives aux plantes, l'identification des traits morphologiques et fonctionnels permet entre autre de prévoir la réussite d'un projet de restauration de cours d'eau en identifiant les traits relatifs à la morphologie racinaire de certaines plantes en fonction de la résistance au déracinement et au type de sol (Burylo, 2010). Il y a donc un intérêt notable à l'identification des traits spécifiques des plantes.

De même, la classification morpho-fonctionnelle est relativement récente dans les sciences appliquées au phytoplancton et elle est régulièrement utilisée depuis peu. Elle connait un enthousiasme certain dans le monde scientifique. En effet, le fait de cataloguer des assemblages naturels d'espèces du phytoplancton permet généralement de révéler des modèles intéressants. Cela permet également de prédire les réponses des espèces du phytoplancton face aux conditions environnementales (Reynolds, 2006; Salmaso et Padisák, 2007; Litchman et Klausmeier, 2008; Kruk *et al.,* 2010). Ainsi, trois approches ont été mises en évidence au cours de ces trente dernières années.

La première approche définie par Reynolds en 1980, permet de mette en évidence les espèces qui sont souvent retrouvées ensembles, qui partage des attributs écologiques communs et des propriétés morphologiques communes, ceci dans le but de définir où les algues se développent et pourquoi. Il met l'accent sur la terminologie de « groupe fonctionnel » qui vise à différencier le phytoplancton sur la base des adaptations et des exigences spécialisées, comme par exemple, une forte affinité pour le phosphore. À l'époque, 14 groupes ont été définis en se basant sur 12 cycles annuels du phytoplancton observés dans quatre lacs naturels anglais (Windermere (bassin nord), Grasmere, Crose Mere et Rostherne Mere) et deux enceintes expérimentales. En 2002, il propose une classification composée de 31 groupes fonctionnels toujours en se basant sur l'idée que les différentes divisions reflètent les réponses de chaque espèce à la variabilité de l'environnement (Figure 5). La création de ces groupes fonctionnels assez facile d'utilisation, est en accord avec les besoins imposés par la DCE. L'utilisation des groupes fonctionnels apparaît régulièrement dans les articles scientifiques, ce qui prouve de son efficacité et de sa facilité d'application. De ce fait, cela a permis une amélioration de ces groupes, notamment

avec l'étude réalisée par Padisák *et al.*, (2009). Cet article met en évidence les problèmes qui se posent lors de l'utilisation de cette méthode et met également à jour les différents groupes et les différentes associations. Effectivement, dans cet article, un point d'honneur est mis sur le fait qu'il faut tout de même utiliser cette méthode avec prudence car répartir des taxons dans des groupes fonctionnels requière des connaissances approfondis dans l'écologie des groupes algaux et des espèces. Une mauvaise interprétation peut alors conduire à de mauvaises conclusions.

Codon	Habitat	Typical representatives	Tolerances	Sensitivities
A	Clear, often well-mixed, base poor, lakes	*Urosolenia, Cyclotella comensis*	Nutrient deficiency	pH rise
B	Vertically mixed, mesotrophic small-medium lakes	*Aulacoseira subarctica* *Aulacoseira islandica*	Light deficiency	pH rise, Si depletion stratification
C	Mixed, eutrophic small-medium lakes	*Asterionella formosa* *Aulacoseira ambigua* *Stephanodiscus rotula*	Light, C deficiencies	Si exhaustion stratification
D	Shallow, enriched turbid waters, including rivers	*Synedra acus* *Nitzschia spp* *Stephanodiscus hantzschii*	Flushing	nutrient depletion
N	mesotrophic epilimnia	*Tabellaria* *Cosmarium* *Staurodesmus*	Nutrient deficiency	stratification pH rise
P	eutrophic epilimnia	*Fragilaria crotonensis* *Aulacoseira granulata* *Closterium aciculare* *Staurastrum pingue*	Mild light and C deficiency	stratification Si depletion
T	deep, well-mixed epilimnia	*Geminella* *Mougeotia* *Tribonema*	Light deficiency	Nutrient deficiency
S1	turbid mixed layers	*Planktothrix agardhii* *Limnothrix redekei* *Pseudanabaena*	highly light deficient conditions	flushing
S2	shallow, turbid mixed layers	*Spirulina* *Arthrospira* *Raphidiopsis*	light deficient conditions	flushing
S_N	warm mixed layers	*Cylindrospermopsis* *Anabaena minutissima*	light-,nitrogen-deficient conditions	flushing
Z	clear, mixed layers	*Synechococcus* prokaryote picoplankton	low nutrient	light deficiency grazing
X3	shallow, clear, mixed layers	*Koliella* *Chrysococcus* eukaryote picoplankton	low base status	mixing, grazing
X2	shallow, clear mixed layers in meso-eutrophic lakes	*Plagioselmis* *Chrysochromulina*	stratification	mixing, filter feeding
X1	shallow mixed layers in enriched conditions	*Chlorella, Ankyra* *Monoraphidium*	stratification	nutrient deficiency filter feeding
Y	usually, small, enriched lakes	*Cryptomonas*	low light	phagotrophs!
E	usually small, oligotrophic, base poor lakes or heterotrophic ponds	*Dinobryon* *Mallomonas* *(Synura)*	low nutrients (resort to mixotrophy)	CO_2 deficiency
F	Clear epilimnia	colonial Chlorophytes e.g. *Botryococcus* *Pseudosphaerocystis* *Coenochloris* *Oocystis lacustris*	low nutrients high turbidity	?CO_2 deficiency
G	Short, nutrient-rich water columns	*Eudorina* *Volvox*	high light	nutrient deficiency
J	shallow, enriched lakes ponds and rivers	*Pediastrum, Coelastrum* *Scenedesmus* *Golenkinia*		settling into low light
K	short, nutrient-rich columns	*Aphanothece* *Aphanocapsa*		deep mixing
H1	dinitrogen-fixing Nostocaleans	*Anabaena flos-aquae* *Aphanizomenon*	low nitrogen low carbon,	mixing, poor light, low phosphorus
H2	dinitrogen-fixing Nostocaleans of larger mesotrophic lakes	*Anabaena lemmermanni* *Gloeotrichia echinulata*	low nitrogen	mixing, poor light,
U	summer epilimnia	*Uroglena*	low nutrients	CO_2 deficiency
L_O	summer epilimnia in mesotrophic lakes	*Peridinium* *Woronichinia* *Merismopedia*	segregated nutrients	prolonged or deep mixing
L_M	summer epilimnia in eutrophic lakes	*Ceratium* *Microcystis*	very low C,	mixing, poor stratification light
M	dielly mixed layers of small eutrophic, low latitude lakes	*Microcystis* *Sphaerocavum*	high insolation	flushing, low total light
R	metalimnia of mesotrophic stratified lakes	*P. rubescens* *P. mougeotii*	low light, strong segregation	instability
V	metalimnia of eutrophic stratified lakes	*Chromatium, Chlorobium*	very low light, strong segregation	instability
W1	small organic ponds	Euglenoids, *Synura* *Gonium*	high BOD	grazing
W2	shallow mesotrophic lakes	bottom-dwelling *Trachelomonas*	?	?
Q	small humic lakes	*Gonyostomum*	high colour	?

Figure 5 : tableau récapitulatif des traits identifiés par Reynolds *et al.*, (2002) : « trait-separated functional groups of phytoplankton »

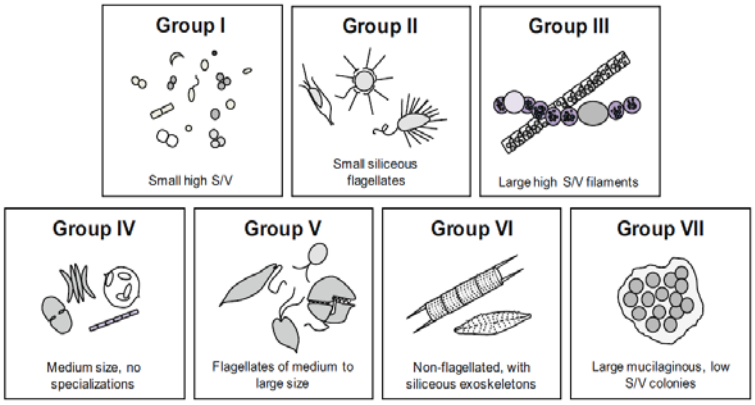
Un autre exemple de classification et celui de Salmaso et Padisák (2007) où des groupes morpho fonctionnels (MFG : Morpho-Functional groups) ont été définis en utilisant des analyses multivariées et en se basant sur les traits utilisés pour réalisés la diversité fonctionnelle (FD : Functional Diversity) d'après Weithoff *et al.*, (2003). Il s'agit de la motilité*, de la capacité d'obtenir du carbone et des nutriments par la mixotrophie*, de la taille et de la forme de la cellule (la séparation des grands et petits taxons s'est basée sur la

possibilité de prédation), des besoins nutritionnels spécifiques et de la présence d'une enveloppe mucilagineuse. Ces critères couplés à la séparation du groupe des cyanobactéries des autres groupes et la prise en compte des différentes stratégies de vie comme autres subdivisions (par exemple la présence de flagelle qui constitue la première division), ont conduit à la différenciation de 31 groupes (Salmaso et Padisák, 2007 - Figure 6). Cette nouvelle approche se base sur deux lacs profonds, un en Italie (Lac de Garde) et un en Allemagne (Lac Stechlin).

Flagellates	Potential mixotrophs	1 Large (colonial or unicellular)	1a Large Chrysophytes/Haptophytes	1a-LargeChry
			1b Large Dinophytes	1b-LargeDino
			1c Large Euglenophytes	1c-LargeEugl
		2 Small (unicellular)	2a Small Chrysophytes/Haptophytes	2a-SmallChry1
			2b Small Dinophytes	2b-SmallDino
			2c Small Euglenophytes	2c-SmallEugl
			2d Cryptophytes	2d-Crypto
	Mostly autotrophs	3 Phytomonadina	3a Unicellular Phytomonadina	3a-UnicPhyto
			3b Colonial Phytomonadina	3b-ColoPhyto
Without flagella	Cyanobacteria	4 Unicellular	4 Unicellular cyanobacteria	4-UnicCyano
		5 Colonies	5a Thin filaments (Oscillatoriales)	5a-FilaCyano
			5b Large vacuolated Chroococcales	5b-LargeVacC
			5c Other large colonies, mostly non-vacuolated Chroococcales	5c-OtherChroo
			5d Small colonies, Chroococcales	5d-SmallChroo
			5e Nostocales	5e-Nostocales
	Diatoms	6 Large	6a Large Centrics	6a-LargeCent
			6b Large Pennates	6b-LargePenn
		7 Small	7a Small Centrics	7a-SmallCent
			7b Small Pennates	7b-SmallPenn
	Others—Unicellular	8 Large	8a Large unicells—Unicellular Conjugatophytes/Chlorophytes	8a-LargeCoCh
			8b Large unicells—Other groups	8b-LargeUnic
		9 Small	9a Small unicells—Conjugatophytes	9a-SmallConj
			9b Small unicells—Chlorococcales	9b-SmallChlor
			9c Small Chrysophytes	9c-SmallChry2
			9d Small unicells—Other groups	9d-SmallUnic
	Others—Colonial	10 Filaments	10a Filaments—Chlorophytes	10a-FilaChlorp
			10b Filaments—Conjugatophytes	10b-FilaConj
			10c Filaments—Xanthophytes	10c-FilaXant
		11 Non filament. colonies	11a Chlorococcales—Naked colonies	11a-NakeChlor
			11b Chlorococcales—Gelatinous colonies	11b-GelaChlor
			11c Other colonies	11c-OtherCol

Figure 6 : classification morpho-fonctionnelle établie par Salmaso et Padisák, (2007) : « morpho-functional groups (MFG) »

Enfin, le troisième exemple est la classification morphologique de Kruk *et al.*, (2010) (puis Kruk *et al.*, 2012) basée principalement sur les traits morphologiques. Cette classification se base sur un ensemble de données de 711 espèces provenant de 211 lacs localisés en Amérique du Sud, en Amérique du nord et en Europe, ce qui permet de couvrir des conditions environnementales différentes. Dans cette étude, il s'agit d'une MBFC ou Morphologically Based Functional Classification qui comprend sept groupe (MBFG ; Figure 7) (Kruk *et al.*, 2010, Kruk *et al.*, 2012). Ce modèle, se base sur des traits, en principe, facilement observables, comme le biovolume, la dimension linéaire maximale, la surface, la présence de mucilage, de flagelle, de vésicule de gaz, d'hétérocyste* et d'exosquelette siliceux. De plus, pour valider leur étude et les différents groupes, ils ont préalablement analysé les relations des traits avec des traits physiologiques mesurables, comme le taux de croissance maximum par exemple et également avec les données de biomasses (données démographiques).



1 Presence of flagella	2 Presence of siliceous structures	**Group II**			
	2' Absence of siliceous structures	3 MLD < 2 µm	**Group I**		
		3' MLD > 2 µm	**Group V**		
1' Absence of flagella	2 Presence of siliceous structures	**Group VI**			
	2' Absence of siliceous structures	3 Presence of mucilage	4 Presence of aerotopes	5 S/V > 0.6 µm^{-1}	**Group III**
				5' S/V < 0.6 µm^{-1}	**Group VII**
			4' Absence of aerotopes	5 V < 10 µm^3	**Group I**
				5' V > 10 µm^3	**Group VII**
		3' Absence of mucilage	4 V < 30 µm^3	5 MLD < 20 µm^3	**Group I**
				5' MLD > 20 µm^3	**Group IV**
			4' V > 30 µm^3	5 Presence of aerotopes	**Group III**
				5' Absence of aerotopes	**Group IV**

Figure 7 : classification des groupes morpho-fonctionnels par Kruk *et al.*, 2010 et Kruk *et al.*, 2012. A gauche, le détail des groupes et à droite, la classification

Izaguirre *et al.*, (2012) a réalisé une comparaison des trois méthodes citées ci-dessus sur un ensemble de 6 lacs peu profond, 3 turbides (valeurs du disque de Secchi faible, présence de MES) et 3 possédant une eau claire et bien végétalisés (plantes immergées et émergées) dans la plaine de Pampa en Argentine. Les résultats ont montrés que la biomasse des groupes algaux correspondant aux trois classifications utilisées peut être bien prédite à partir des variables environnementales et toutes les analyses montrent une séparation des lacs turbides et des lacs clairs et végétalisés.

L'auteur en déduit que pour utiliser les trois classification étudiées (Reynolds *et al.*, 2002, Kruk *et al.*, 2010 et Salmaso et Padisák, 2007), il est nécessaire d'avoir des connaissances en taxonomie approfondies ainsi que sur les fonctions et capacités du phytoplancton.
Il en conclut que de manière générale, la classification morpho-fonctionnelle permet une bonne approche pour analyser les différences entre des lacs et ça peut même s'avérer utile pour le biomonitoring environnementale.
Il précise que la classification de Kruk *et al.*, (2010) pourrait être essentielle lors d'études sur le long terme ou lors de comparaisons d'un nombre important de lacs. La classification de Reynolds *et al.*, (2002) et les modifications apportées par Padisák *et al.*, (2009) donne plus de détails et d'informations par rapport aux différents assemblages phytoplanctoniques. Également, il en ressort que pour la classification de Salmaso et Padisák, (2007), les différences de milieux sont mises en avant. C'est alors très utile pour les études des systèmes aquatiques d'une région.

De plus, de nombreuses études réalisées dans le monde se basent sur ces classifications. C'est notamment le cas de Rakocevic *et al.*, (2012) sur trois lacs du Montenegro, Kruk *et al.*, (2002) en Uruguay selon la méthode de Reynolds *et al.*, (2002).
C'est dans ce contexte d'identification des traits morpho-fonctionnels pertinents que nous avons décidés de réaliser cette étude. Un accent a été mis sur les traits morphologiques car plus faciles à utiliser. Cependant, nous avons mis de côté le système de classification car ce n'était pas le but premier de l'étude.

4.2 Les recherches bibliographiques

Afin de m'aider dans la réalisation de l'inventaire de traits morpho-fonctionnels, j'ai préalablement recherché tous ceux apparaissant régulièrement dans la littérature. J'ai alors trouvé les relations existantes entre les traits et des facteurs physiques et chimiques. Par exemple, la taille aurait une influence sur la capacité à acquérir et assimiler les nutriments, etc. Ci-dessous se trouvent quelques relations qui me semblent primordiales dans le fonctionnement écologique du phytoplancton :

- **L'acquisition des nutriments et de la lumière** : la taille, la forme des cellules et la possibilité de former des colonies*, influence l'acquisition de la ressource (Litchman et Klausmeier, 2008 ; Weithoff, 2003). De plus, la disponibilité de la lumière est le facteur principale de mise en forme des assemblages du phytoplancton dans les environnements eutrophiques et hypertrophiques (Naselli-Flores *et al.*, 2007b).

- <u>Avantages des petites et des grandes cellules</u>

Pour ce critère, une distinction a largement été établie entre les cellules de grandes et de petites tailles. En effet, des valeurs élevées du ratio Surface/Volume (S/V) sont communes dans des organismes de petites tailles et sont souvent liées à un meilleur flux de nutriments par unité de volume (Morabito *et al.*, 2007)., et d'une efficacité photosynthétique plus élevée (Naselli-Flores *et al.*, 2007b). Ce ratio permet aux cellules de petite taille (cellules de 10 à 20 µm) d'être avantagées dans des conditions limitantes en nutriments (Litchman *et al.*, 2010). De plus, le haut ratio S/V des petites cellules permet une absorption de lumière nettement plus efficace (Stanca *et al.*, 2012). De même, les petites cellules du phytoplancton semblent avoir certains avantages du fait de la faible diffusion des couches limites de la paroi. Elles captent mieux la lumière, ce qui leur permet d'utiliser plus efficacement les ressources disponibles (Jiang *at al.*, 2005). Également, elles seraient capables de remplir leur besoins nutritionnels dans des environnements chroniquement pauvres en nutriments contrairement aux cellules de plus grande taille (Reynolds, 2007). D'autres études ont pareillement montrées que les cellules de petites tailles auraient un taux de croissance plus élevé que les cellules de grandes tailles dans des conditions de faibles luminosité (Finkel *et al.*, 2009).

Les cellules de grandes tailles possèdent quant à elles, plus d'avantages dans des conditions de fluctuation de nutriments en raison de l'augmentation de leur capacité de stockage des éléments nutritifs (Litchman *et al.*, 2010). Effectivement, dans des concentrations sous-optimales de nutriments, la taille devient pertinente, car un plus grand nombre de systèmes de transport peuvent être hébergé sur une plus grande surface. Ceci, éventuellement couplé avec des voies métaboliques de stockage des nutriments et/ou des contours de mucilage (tous deux présents dans les cyanobactéries par exemple) peut augmenter le succès de la compétitivité des grandes cellules, dans des conditions de pénurie de nutriments, mais cela nécessite un apport plus

important de lumière (Naselli-Flores et Barone, 2011). Les mécanismes de sélection pour de grandes espèces du phytoplancton impliquent un compromis entre la capacité de stockage et l'exigence minimale de nutriments. Les cellules de grande taille exigent plus de nutriments, mais ont un quota de cellule supérieur à l'équilibre, ce qui leur permet de produire de la biomasse plus rapidement, leur donnant ainsi un avantage dans des conditions d'assimilation limitée (Verdy *et al.*, 2009).

- Forme de vie : cellule ou colonie*

Ce trait de vie n'est pas le meilleur pour expliquer l'acquisition des nutriments et est principalement relié à la taille. Ceci accentue le fait que l'information sur la taille de l'espèce est primordiale. En effet, la taille des cellules individuelles (la dimension linéaire maximale et le volume par exemple) constitue un trait fondamental pour l'acquisition de la lumière et des nutriments alors que la taille des colonies/filaments* est associé à la pression du broutage (Fraisse, 2013). De plus, le taux de croissance et d'acquisition net des éléments nutritifs pourraient être meilleur sous une forme coloniale que sous forme solitaire (Beardall *et al.*, 2008).

En ce qui concerne l'acquisition de la lumière, les petites cellules unicellulaires, les organismes non flagellés, les filaments fins ou les petites colonies prévalent largement dans les environnements où la lumière est limitée (O'Farrell *et al.*, 2007 ; Naselli-Flores *et al.*, 2007).
Les filaments sont des antennes efficaces pour l'absorption de la lumière et peuvent donc effectuer la photosynthèse efficacement dans des conditions de faibles luminosité ambiante (Padisák *et al.*, 2003). De même, l'enroulement des trichomes*, en plus d'éviter un phénomène de broutage intense, permettrait d'augmenter l'assimilation de la lumière (Naselli-Flores et Barone, 2011).

- Forme de la cellule : allongée ou sphérique

La forme sphérique favorise l'absorption des nutriments et la diffusion intracellulaire. Elle serait alors la forme la plus adaptée sous les concentrations de nutriments variables, ceci couplé à des disponibilités en lumière (Naselli-Flores et Barone, 2011). On a vu plus haut que les petites cellules étaient plus favorisées que les grandes dans des conditions similaires de disponibilité en nutriments, cependant, d'après Stanca *et al.*, (2012), cette particularité est seulement applicable aux organismes sphériques ou presque sphériques. En effet, la limitation de diffusion de la ressource est proportionnelle au rayon de la cellule. Ainsi, une grande cellule peut être avantagée par rapport à une petite cellule de forme très allongée (Stanca *et al.*, 2012).

- Facteur de motilité*

La motilité des cellules influence positivement l'acquisition des ressources (Litchman et Klausmeier, 2008). La motilité offre la capacité de migrer le long de la colonne d'eau et d'avoir une utilisation optimale des ressources (lumière, nutriments) dans des environnements

hétérogènes (Salmaso et Padisák, 2007). Ainsi, les flagelles permettent aux espèces d'exploiter les zones où les nutriments sont plus concentrés (Fraisse, 2013). La motilité des espèces permet donc la recherche de nourriture qui, en parallèle avec la production de sacs membraneux ("cysts"), pourrait augmenter la tolérance à des conditions nutritives faibles (Kruk *et al.,* 2010). Plus particulièrement, Reynolds (2006) a montré que les cyanobactéries possédant des vésicules de gaz sont associés à des environnements de faible luminosité et où la productivité est faible. En effet, les vésicules de gaz sont synthétisées par plusieurs cyanobactéries (ex : *Microcystis*) et permettent en premier lieu, un contrôle de la flottabilité. Cependant, il a été constaté que ces vésicules diminuaient avec l'augmentation de la photosynthèse en raison de la pression de turgescence.

- La présence de cellules spécialisées

Les cyanobactéries possèdent des cellules spécialisées dont les hétérocystes*. Ces cellules permettent la fixation de l'azote atmosphérique. Ainsi, le développement d'hétérocystes indique une faible disponibilité de l'azote dans l'eau, mais ils peuvent aussi être présents lorsque la compétition pour les nutriments est forte. (Litchman *et al.,* 2010).

La présence de mucilage permet également une séquestration des nutriments dans la cellule (Naselli-Flores *et al.*, 2007).

La mixotrophie* est aussi une stratégie qui donne un avantage dans des conditions de faibles teneurs en nutriments. Habituellement, les groupes d'algues mixotrophe sont de faibles compétiteurs pour les nutriments inorganiques (Litchman et Klausmeier, 2008). Certaines cellules flagellées mixotrophes peuvent commencer à consommer des bactéries riches en phosphore lorsque le phosphore inorganique est épuisé dans le milieu (Naselli-Flores et Barone, 2011).

- **La résistance au phénomène de « grazing » (prédation) :** Les adaptations anti-brouteurs comprennent la taille globale, la morphologie, le mucilage extracellulaire, et un haut ratio carbone/nutriments (Reynolds, 2006), mais aussi parfois, une production de toxines (Litchman et Klausmeier, 2008).

- Capacités des petites et des grandes cellules

Il est largement admis que les petites algues sont plus sensibles au broutage par rapport aux algues de grande taille (Stanca *et al.,* 2012). Suivant les études les classes de tailles des espèces comestibles varient, mais d'une manière globale, la taille de ces dernières est inférieure à 30-40 µm (Salmaso, 2002). Ainsi, les petites cellules devraient dominer dans des conditions d'état stable en l'absence de prédateurs (Verdy *et al.,* 2009). Cependant, bien que le picophytoplancton (0,2 µm-2 µm) puisse échapper au broutage par les grands herbivores de par sa petite taille, il peut toujours être consommé par les petits brouteurs (Raven *et al.,* 2005). En effet, plus la taille de la cellule est grande, moins les consommateurs directs potentiels sont

présents (Reynolds, 2007). Les algues dites « immangeables » sont supérieures à 40-50 µm et comprennent également les colonies* où filament qui sont nettement moins comestibles que les cellules solitaires (Salmaso, 2002). De manière générale, la grande taille des organismes phytoplanctoniques offre des avantages sur la motilité, le stockage et la persistance, la capacité de contrôler la position verticale, accéder à des sources de nutriments indisponibles permet également d'éviter le broutage pour certaines espèces. Cela offre ainsi une plus grande possibilité de survie (Reynolds, 2006).

- Forme de vie : colonie*

Il a souvent été mis en évidence dans les études scientifiques que l'augmentation de la taille par la formation de colonies notamment, constitue une protection vis-à-vis de la prédation. En effet, elles permettent l'évitement des petits brouteurs par rapport aux organismes solitaires (Beardall *et al.,* 2008). De plus, quand un prédateur se nourrit d'une colonie, celle-ci peut se fragmenter en petits individus qui deviennent alors trop petit pour le prédateur en question. La survie de l'espèce est alors possible (Beardall *et al.,* 2008). La présence de mucilage souvent retrouvée chez les colonies et filaments* est un avantage pour résister au broutage (Beardall *et al.,* 2008). Cependant, un des désavantages flagrant est qu'elle est tout de suite plus visible qu'une cellule solitaire ce qui peut dans un sens augmenter les risques de prédation (Beardall *et al.,* 2008).

De même, les protubérances parfois visibles chez certaines espèces du phytoplancton seraient utiles pour résister au zooplancton. Par exemple, les poils en chitines sont susceptibles d'aider à la flottaison, mais pourrait également être un dispositif anti-broutage (Naselli-Flores et Barone, 2011).

Certaines caractéristiques propres à certains groupes d'algues auraient une influence notable sur la résistance à la prédation par le zooplancton. Par exemple, la présence de paroi siliceuse, comme chez les diatomées, permettraient d'avoir une meilleure défense face à la prédation mais aussi face aux infections virales (Kruk *et al.,* 2010). La fabrication de toxines chez certaines cyanobactéries influencerait également l'intensité de prédation (Litchman et Klausmeier, 2008).

Ces paramètres morphologiques (taille, biovolume, possibilité de former des colonies, présence de cellules spécialisées etc.) sont ceux qui apparaissent les plus souvent dans la littérature. La partie ci-dessus explique quelques interactions qu'il peut y avoir avec certains facteurs du milieu et qui peut donc avoir un impact sur la survie des espèces. Il s'agit en réalité d'un ensemble de traits et de caractères qui permettent au phytoplancton de survivre dans certains milieux. C'est pour cela qu'il est nécessaire de comparer les traits relatif à la taille, forme, type de vie etc. aux conditions environnementales des lacs mais aussi à la biomasse des espèces qui sont retrouvées pour chaque campagne.

4.3 Méthode employée pour l'étude

Les recherches bibliographiques et les flores (Bourrelly, 1968, 1970 et 1990, Huber *et al.*, 1974, John *et al.*, 2011, Guiry et Guiry, 2014) m'ont permis de définir les traits morpho-fonctionnels important dans l'étude du phytoplancton. Dans un premier temps, j'ai donc identifié 75 traits relevant à la fois de la morphologie, du fonctionnement de l'espèce mais aussi de son écologie, me paraissant important pour comprendre les successions du phytoplancton dans les lacs (Annexe 12). Finalement, la complexité d'acquisition des données m'a conduit à réduire le nombre de paramètres pour pouvoir par la suite les analyser statistiquement. Cependant, ce tableau sera utilisé ultérieurement pour créer une base de données qui pourra être complétée avec de nouvelles espèces et de nouveaux traits si besoin.
Ainsi, 28 traits ont été conservés. Puis ils ont été catégorisés en données binaires (0 = absence du trait ou 1 = présence du trait) pour chaque espèce du phytoplancton trouvé dans les lacs aquitains étudiés.

Les traits morpho-fonctionnels gardés et utilisés dans cette étude combinent les approches de différentes études préalablement réalisées par des scientifiques comme l'approche de Weithoff, (2003), Kruk *et al.*, (2010) et Cellamare *et al.*, (2013) :

- La forme de vie : ce trait indique si la forme de vie de l'individu est une cellule solitaire, une colonie* ou un filament*. La colonie regroupe les coenobiums*. Ce classement a été réalisée en se basant sur la forme de vie la plus courante de l'espèce considérée (il arrive que certaines espèces soient retrouvées sous forme de cellule simple et sous forme de colonie par exemple).

- Le biovolume : ce trait est le plus représentatif pour l'étude du phytoplancton car il est utilisé comme un proxy de la taille de l'espèce. On a défini 5 classes de tailles : <10 μm^3, 10,1-100 μm^3, 100,1-1000 μm^3, 1000,1-10000 μm^3, >10000 μm^3 comme dans l'étude de Cellamare *et al.*, (2013). Le biovolume utilisé ici est un biovolume soit théorique de référence qui a été élaboré d'après des données de la littérature, soit calculé sur les échantillons des lacs. Pour des résultats plus concrets et spécifiques aux espèces, il aurait fallu calculer ce biovolume pour tous les taxons à partir des mesures prises directement lors de l'identification. Cependant, ce travail est complexe et long, c'est pourquoi nous avons décidé de nous concentrer seulement sur ces biovolumes génériques.

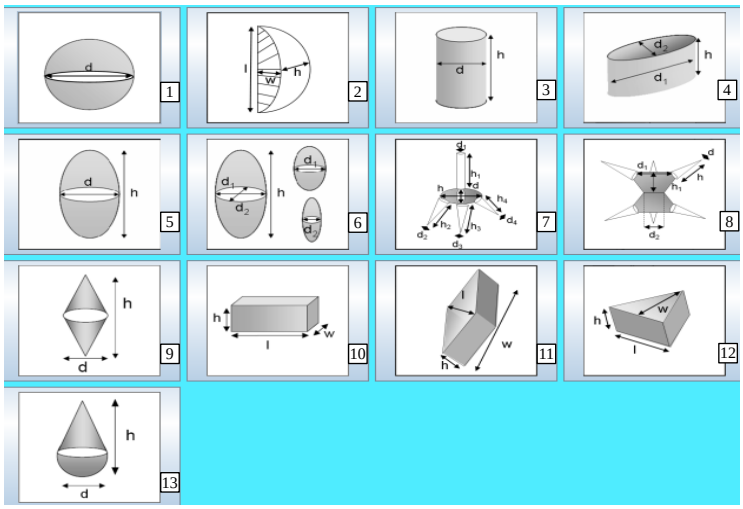
- La taille maximale des individus d'après les informations trouvées dans la littérature a été renseignée. Ce trait a été défini à partir de la nomenclature proposée par Sieburth *et al,*. (1978) car cette approche a souvent été utilisé et adoptée dans les études sur le phytoplancton car elle permet de distinguer une séparation fonctionnelle entre les espèces du phytoplancton

(Reynolds, 2006). Nous nous sommes basés sur les informations trouvées dans les articles scientifiques et dans les différentes flores afin de compléter ce trait. Ainsi, 5 classes de taille ont été définies (Tableau 3):

Tableau 3 : classification du phytoplancton à partir de la nomenclature de Sieburth *et al,*. (1978). Source : Reynolds (2006)

Dimension linéaire maximale	Nom du groupe
0,2 – 2 µm	Picophytoplancton
2 – 20 µm	Nanophytoplancton
20 – 200 µm	Microphytoplancton
200 µm – 2 mm	Mésophytoplancton
> 2 mm	Macrophytoplancton

- La forme « géométrique » de la cellule a également été renseignée. Toutes les formes des cellules du phytoplancton ont été définies à partir de formes trouvées dans littérature (Hillebrand *et al.*, 1999 ; Sun et Liu., 2003). Ensuite, 14 formes sont implémentées dans la base de données de PHYTOBS (le logiciel de comptage phytoplanctonique créé par Irstea), nous nous sommes donc basés sur celles-ci. La Figure 8 ci-dessous représente les forme retenues.



Formes
Sphère (1)
Cymbelloïde (2)
Cylindre (3)
Cylindre ovale (4)
Ellipsoïde rotationnelle (5)
Ellipsoïde aplatie (6)
Forme de *Ceratium* (7)
Forme de *Staurastrum* (8)
Double cône (9)
Parallélépipède (10
Prisme sur une base de parallélogramme (11)
Prisme sur une base triangulaire (12)
Cône avec une demi-sphère (13)
Ellipsoïde (non représentée)

Figure 8 : formes géométriques utilisées pour décrire le phytoplancton. Source: logiciel de comptage PHYTOBS

- La motilité* : il s'agit de la capacité physiologique d'une espèce à effectuer des mouvements. Dans le cas du phytoplancton, les espèces possédant un ou plusieurs flagelles sont motiles. La présence de vacuole de gaz, de mucilage ou des vacuoles contractiles* par exemple est également un facteur de motilité.

- La présence de flagelles, aérotopes, mucilage et vacuoles contractiles* (ex : *Chromulina*, Figure 9-C). Cela constitue 4 nouveaux traits bien distincts puisqu'ils entrent en jeux dans d'autres interactions (exemple avec la prédation ou pour l'acquisition des nutriments).

- La présence de cellules spécialisées spécifiques aux cyanobactéries. Il s'agit de définir si l'espèce possède des akinètes*. Les akinètes* étant des structures de stockage.

- La fixation de l'azote. Cela revient à indiquer s'il y a présence ou non d'hétérocystes* (cellules permettant la fixation de l'azote atmosphérique). Ce trait est très important car il permet aux espèces possédant ce trait d'avoir une source de nutriment supplémentaire (azote atmosphérique) quand les ressources de bases viennent à manquer.

- La production de toxines provient exclusivement d'espèces de cyanobactéries (Bartram, 1999) sur les lacs considérés. D'ailleurs, il y a de plus en plus de risques avec ces toxines de cyanobactéries pour la santé humaine.

- La mixotrophie*. Ce trait donne des informations sur les possibilités d'adaptation au milieu si certaines sources de nutriments viennent à manquer. En effet, une espèce de phytoplancton mixotrophe est une espèce capable de combiner deux modes de nutritions, l'autotrophie* et l'hétérotrophie* (Cellamare *et al.*, 2013).

- La présence ou non de certains pigments constitue également un trait. Cinq pigments photosynthétiques différents qui forment les grandes familles que l'on retrouve dans la littérature ont été choisis (Cellamare, 2009). Il s'agit de la chlorophylle *a* (que toutes les espèces du phytoplancton possèdent), les chlorophylles *b*, les chlorophylles *c*, les xanthophylles, et les phycobilines. Par exemple, les cyanobactéries possèdent de la chlorophylle *a* et des phycobilines. Il s'agit par ailleurs du seul groupe du phytoplancton possédant ce pigment.

- La présence de chloroplastes permet de discriminer les cyanobactéries car ils sont remplacés par les thylacoïdes* dans ce groupe.

- La présence d'une gaine chez certaines espèces peut permettre une résistance au broutage mais également une protection face aux turbulences par exemple.

- Le squelette siliceux typique des diatomées a été relevé car il permet d'identifier ce groupe.

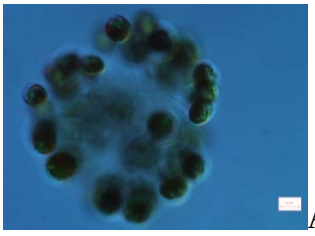
- La présence de lorica*, de plaques durs et d'écailles siliceuses a été déterminée. La carapace formée est un moyen de protection face aux prédateurs mais peut s'avérer néfaste et accentuer le phénomène de sédimentation.

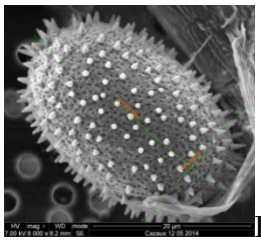
- On a également souhaité observer si la présence d'ornementation (ponctuations par exemple) et donc le fait que la paroi soit lisse ou non a un impact dans la répartition des algues sur nos quatre lacs. C'est pourquoi ces 2 traits ont été renseignés pour chaque taxon.

- La présence d'un tractus : certaines cellules de la même espèce sont attachées entre elles par un tractus pour former une colonie (ex : *Dictyospharium pulchellum,* Figure 9-A).

- La présence de protubérance. Certaines espèces disposent d'épines, de boutons, de poils autour de la cellule sur la paroi (ex : *Trachelomonas hispida,* Figure 9-B). Cela peut conduire à une résistance au broutage ou bien à une forme de résistance dans la sédimentation.

- Le mode de reproduction. Principalement, la capacité de réaliser les deux types de reproduction a été renseignée (sexuée et asexuée). La possibilité de combiner les deux modes de reproduction est un facteur important dans l'adaptation des espèces. En effet, plusieurs groupes taxonomiques (ex: diatomées, dinoflagellés, et les algues vertes), sont capables d'utiliser les deux modes de reproduction alors que d'autres (ex : cyanobactéries et quelques cryptophytes) peuvent seulement se reproduire asexuellement (Litchman et Klausmeier, 2008). La capacité de réaliser les deux types de reproduction peut permettre à une espèce de survivre lorsque les conditions du milieu ne sont plus favorables. Ainsi, le second mode de reproduction prend le relais.


A


B

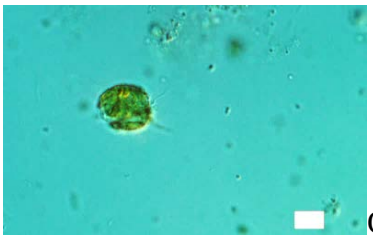

C

Figure 9 : espèces du phytoplancton présentant des traits morphologiques particulier. Source : Laplace-Treyture, 2014. A : *Dictyospharium pulchellum* avec tractus (x1000). B : *Trachelomonas hispida* avec protubérances au microscope à balayage. C : *Chromulina* avec flagelles (x1000). Source : Laplace-Treyture, 2014.

Ces paramètres ont été choisis car ils caractérisent à leur façon des groupes d'algues spécifiques. Ils permettent de mettre en évidence certaines espèces et d'en éliminer d'autres.

5 *Résultats*

5.1 La structure de la communauté phytoplanctonique

Le but de cette partie est de représenter les successions des espèces du phytoplancton des quatre lacs. La richesse algale totale observée au cours des 6 campagnes de prélèvement de 2014. Le Tableau 4 ci-dessous nous informe du nombre d'espèces différentes identifiées sur chaque lac pour chaque campagne. On peut observer que le lac de Lacanau possède la plus forte richesse algale avec 149 espèces alors que le lac de Cazaux-Sanguinet possède la plus faible avec 116 espèces.

Tableau 4 : richesse taxinomique des quatre lacs pour chaque campagne de prélèvement en 2014

	Parentis-Biscarrosse	Cazaux-Sanguinet	Hourtin-Carcans	Lacanau
Janvier	45	49	55	54
Février	36	48	52	57
Mars	35	33	38	51
Avril	44	34	30	46
Mai	56	44	55	54
Juin	67	41	42	50
Richesse 2014	**119**	**116**	**125**	**149**
Abondance totale (nb obj/ml)	**294 096**	**21 909**	**168 012**	**82 731**

- **Lac de Parentis-Biscarrosse**

La communauté phytoplanctonique du lac de Parentis-Biscarrosse est composée de 119 taxons différents retrouvés tout au long de l'étude, incluant 39 espèces de chlorophycées, 13 de chrysophycées, 4 de cryptophycées, 27 de cyanobactéries, 5 de dinophycées, 3 d'euglénophycées, 19 de diatomées et 9 espèces de desmidiées.

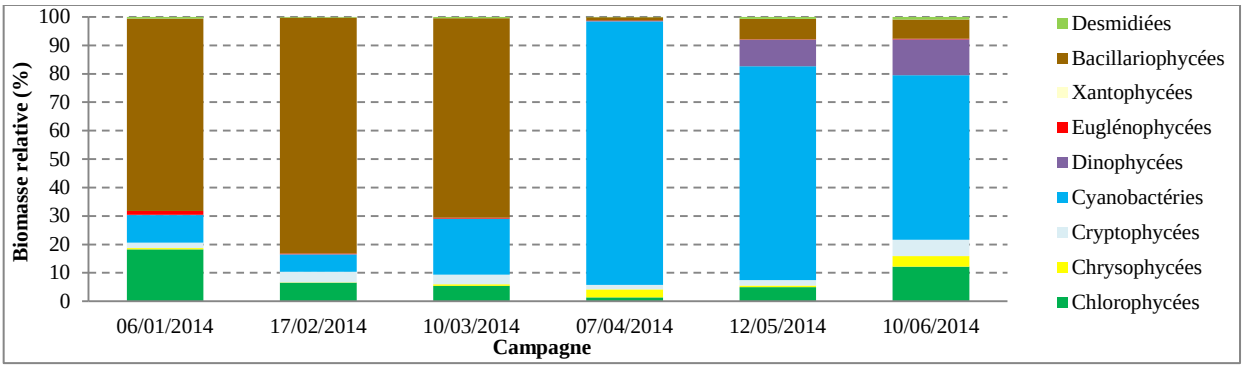


Figure 10 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de la biomasse phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Parentis-Biscarrosse

La Figure 10, ci-dessus, présente la dynamique saisonnière des principales classes d'algues. On observe qu'en janvier, février et mars le groupe algal qui prédomine est le groupe des bacillariophycées avec respectivement 68 %, 90 % et 70 % de la biomasse totale pour chacun de ces mois. En effet, en janvier l'espèce dominante est *Aulacoseira ambigua*, une diatomée

centrique représentant 18 % de la biomasse totale. En février il s'agit d'*Aulacoseira subarctica* avec 37 % et en mars, l'espèce contribuant le plus à la biomasse totale est *Asterionella formosa* avec 27 %. En ce qui concerne les autres mois, on voit nettement la domination des cyanobactéries qui représentent en avril 93 % de la biomasse totale. En mai, elles représentent 75 % de la biomasse totale et en juin, 57 %. Pour chaque mois, une espèce est dominante en termes de biomasse. En avril, il s'agit d'*Aphanizomenon gracile* qui est une algue filamenteuse et dont la biomasse représente 89 % de la biomasse totale de l'échantillon. En mai et juin, l'espèce dominante est *Planktothrix agardhii*, également filamenteuse, avec 36% et 47 % de la biomasse totale.

- **Lac de Cazaux-Sanguinet**

La communauté phytoplanctonique du lac de Cazaux-Sanguinet est composée de 116 taxons différents retrouvés tout au long de l'étude, incluant 33 espèces de chlorophycées, 21 de chrysophycées, 5 de cryptophycées, 17 espèces de cyanobactéries, 5 de dinophycées, 1 de xanthophycées, 23 espèces de diatomées et 11 espèces de desmidiées.

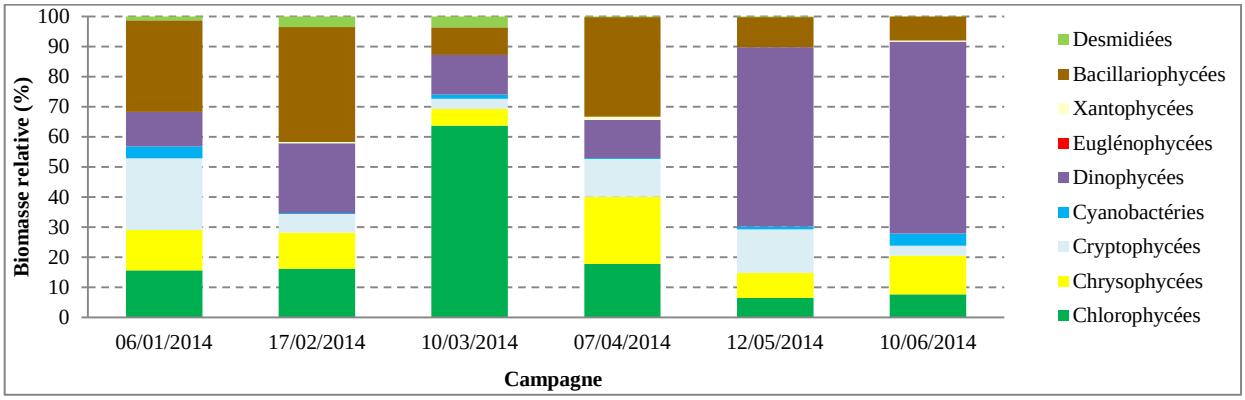


Figure 11 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de la biomasse phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Cazaux-Sanguinet

Dans ce lac on observe des variations très marquées dans la succession du phytoplancton (Figure 11). En janvier, les diatomées et les cryptophycées semblent légèrement supérieure par rapport aux autres groupes algaux. Les diatomées possèdent la plus forte biomasse avec 30 % de la biomasse totale suivi de près par les cryptophycées avec 23 %. Cependant, l'espèce possédant la plus forte biomasse durant ce mois, est une petite cryptophycée, l'espèce *Cryptomonas erosa* (13 %). Au mois de février, le groupe de diatomées dominent avec une biomasse relative de 38 %. Celle-ci est légèrement supérieure au résultat précédant. Cependant, l'espèce possédant la plus forte biomasse est *Peridinium umbonatum* il s'agit d'une petite dinophycée. Effectivement, cette différence s'explique car il y a eu plus de taxons de bacillariophycées retrouvés, ainsi la somme des biomasses par rapport à la biomasse totale est nettement supérieure à celles de toutes les dinophycées. En mars, le groupe des chlorophycées possédait une biomasse relative de 63 %, et le genre *Trochiscia* est celui qui contribue le plus à la biomasse totale. Les bacillariophycées dominent de nouveau en termes de biomasse relative

au mois de mai avec 33 % de la biomasse totale. L'espèce contribuant le plus à la biomasse totale est *Puncticulata radiosa* (diatomée centrique) avec 25 %. Aux mois de mai et de juin les dinophycées sont les plus abondantes avec 59 % et 63 % de la biomasse totale. Tout comme en février, il s'agit de *Peridinium umbonatum* qui possède la biomasse la plus importante. C'est dans ce lac que les biomasses totales sont les plus faibles.

- **Lac d'Hourtin-Carcans**

La communauté phytoplanctonique du lac d'Hourtin-Carcans est composée de 125 taxons différents retrouvés tout au long de l'étude, incluant 43 espèces de chlorophycées, 16 de chrysophycées, 3 de cryptophycées, 26 de cyanobactéries, 7 de dinophycées, 1 de xanthophycées, 13 de diatomées et 16 de desmidiées.

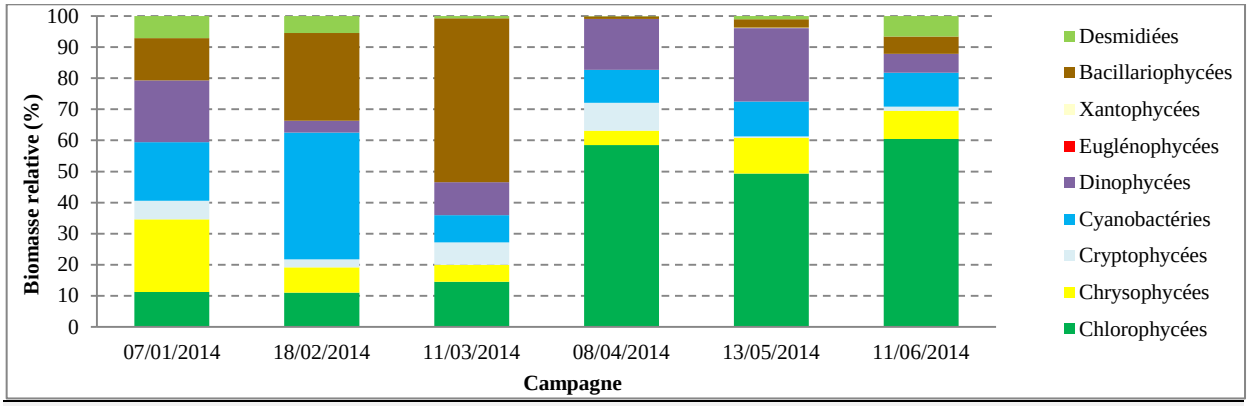


Figure 12 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de l'abondance phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac d'Hourtin-Carcans

En ce qui concerne le lac d'Hourtin-Carcans (Figure 12), on constate au premier abord que pour les trois derniers mois le groupe le plus abondant est celui des chlorophycées avec 59 %, 49 % et 60 % de la biomasse totale.

Si l'on s'attarde sur les mois d'avril, mai et juin, l'espèce possédant la biomasse relative la plus forte est une chlorophycée du nom de *Tetrastrum triangulare* (principalement retrouvée sous forme de colonie) avec 39 %, 33% et 38 %. En janvier, il n'y a pas de dominance nette entre le groupe des chrysophycées, des cyanobactéries et des dinophycées malgré une légère supériorité pour les chrysophycées. En février, les cyanobactéries possèdent la plus forte biomasse relative. L'espèce *Radiocystis geminata* y domine avec 14 % de la biomasse totale. En mars, on observe un changement. En effet, avec une biomasse relative de 53 % les diatomées dominent. L'espèce caractéristique de ce mois est également une diatomée centrique, *Actinocyclus normanii* participant à la biomasse totale à 51%.

- **Lac de Lacanau**

La communauté phytoplanctonique du lac de Lacanau est composée de 149 taxons différents retrouvés tout au long de l'étude, incluant 46 espèces de chlorophycées, 21 de chrysophycées, 8 de cryptophycées, 25 de cyanobactéries, 9 de dinophycées, 1 d'euglénophycées, 26 de diatomées et 13 de desmidiées.

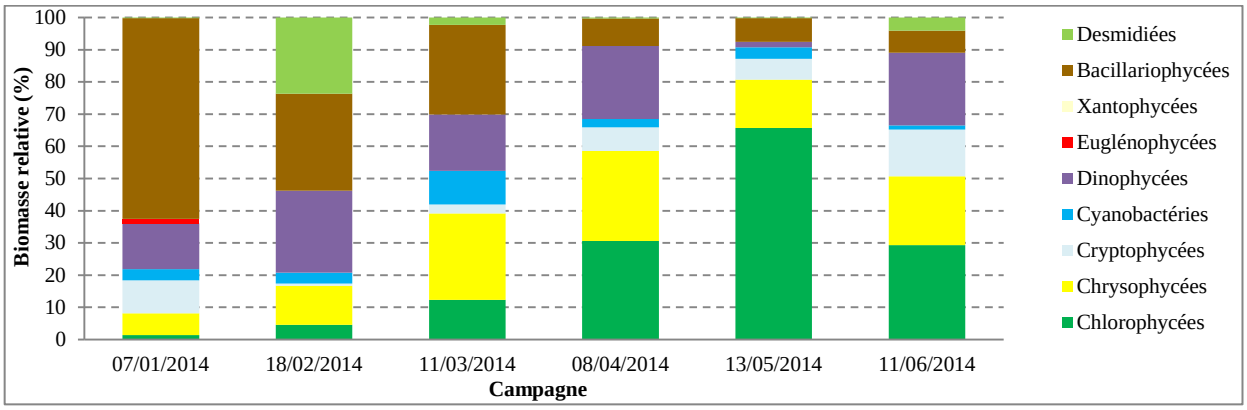


Figure 13 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de l'abondance phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Lacanau

La Figure 13 permet de constater, dans un premier temps, que la proportion de chlorophycées augmente au cours des mois de l'année et atteint son maximum en mai avec une biomasse relative de 66 % avant de décroître en juin. Ainsi, en avril, l'espèce dominante est la chlorophycée *Trochiscia planctonica* (20 %), en mai il s'agit de *Tetraedron incus* (26 %).Enfin en juin, la décroissance des chlorophycées étant importante, une dinophycées devient dominante, il s'agit de *Peridinium umbonatum* avec 21 % de la biomasse totale. En janvier, février et mars, ce sont les diatomées qui contribuent le plus à la biomasse totale de chaque campagne avec une biomasse relative de 62 %, 24 % et 28 %. En effet en janvier et mars, le taxon *Ulnaria delicatissima var. angustissima* qui est une bacillariophycée domine. La contribution de cette espèce est de 50 % pour janvier et 19 % pour mars. En février il s'agit d'une espèce de desmidiées, *Staurastrum tetracerum* avec une contribution à la biomasse totale de 23 %.

5.1.1 Observation de la communauté phytoplanctonique avec les tests statistiques

Les tests statistiques ont été réalisés à partir des biomasses calculées grâce au logiciel PHYTOBS, des variables environnementales, et du tableau descriptif des traits. Les taxons relevés (Annexe 13) mais indéterminés (car en mauvais état, ne présentant pas les critères nécessaires à l'identification) ne sont pas retenus dans les tests statistiques. Également, certaines espèces, rares, qui n'ont pas de biovolume théorique renseigné dans la base de données de PHYTOBS, n'ont pas été prises en compte. Ainsi, 241 espèces ont été détaillées dans le tableau de traits morphologiques. En termes de richesse, 74 chlorophycées ont été identifiées, 50 de cyanobactéries, 35 de bacillariophycées, 33 de chrysophycées, 27 de desmidiées, 9 de dinophycées, 4 d'euglénophycées et 2 de xanthophycées. Il y a toujours une dominance du lac de Lacanau avec une richesse de 133 espèces différentes, alors que Parentis-Biscarrosse en possède 115, Hourtin-Carcans, 114 et Cazaux-Sanguinet, 110.

Tableau 5 : biomasse totale de chaque lac pour chaque campagne de prélèvement en 2014 en éliminant les espèces sans biovolume et indéterminées

	Parentis-Biscarrosse	Cazaux-Sanguinet	Hourtin-Carcans	Lacanau
Janvier	861,70	814,52	601,92	2206,89
Février	2313,21	584,11	341,31	952,93
Mars	1323,62	226,36	586,14	747,06
Avril	11430,51	189,05	654,80	997,30
Mai	3598,13	574,18	1978,07	3040,72
Juin	2769,73	1270,75	4906,74	2644,09
Totale	**22296,91**	**3658,97**	**9068,99**	**10588,99**

Pour réaliser nos tests statistiques, nous nous sommes basés sur la valeur de biomasse calculée à partir des biovolumes déterminés lors du comptage. En effet, la biomasse est plus représentative que l'abondance (en nombre de cellules par millilitre) d'un taxon et aura un poids différent dans le milieu. On constate à partir du Tableau 5, que pour les lacs de Cazaux-Sanguinet, Hourtin-Carcans et Lacanau la valeur de la biomasse en janvier est élevée puis diminue pour atteindre un minimum en février. Le mois d'avril montre une augmentation très forte pour le lac de Parentis-Biscarrosse. Les autres lacs augmentent globalement progressivement jusqu'au mois de juin.

- **Analyse Multidimensionnelle Non Métrique (NMDS) avec les valeurs de la communauté phytoplanctonique des lacs**

La réalisation d'une NMDS est relativement courante dans le milieu des sciences et principalement de la biologie. En effet, c'est souvent la méthode choisie pour représenter graphiquement les relations entre les communautés (Clarke, 1993). Le calcul des distances a été effectué automatiquement par la méthode de Bray-Curtis (Aujourd'hui on parle plus souvent de la méthode de Sørensen) grâce au package « Vegan » du logiciel R. On a réalisé un barplot (Annexe 14-A) afin de définir le nombre de dimensions significatives dans notre échantillon. Il en ressort que ce sont les 5 premiers axes qui expliquent la majeure partie de la variance dans les communautés du phytoplancton. La valeur du stress est de 0,07, ce qui fournit représentation adéquate sans véritable risque d'erreur (Clarke, 1993). La représentation graphique de Shepard (Annexe 14-B) montre les distances de l'ordination représentées contre les dissimilarités de la communauté et l'ajustement est comptabilisé comme une ligne de pas monotone. La faible dispersion autour de la ligne suggère que les dissemblances d'origines sont bien conservées. Cela s'explique pour le grand nombre de dimensions choisies.

La Figure 14 (A et B) ci-dessous, représente les deux premiers axes de la NMDS réalisé sur la matrice des communautés pour les quatre lacs à chaque campagne (soit 24 campagnes). La Figure 14-A, montre clairement une séparation des lacs en termes de composition algale, en particulier pour les lacs de Parentis-Biscarrosse et de Hourtin-Carcans. Les lacs de Lacanau et de Cazaux-Sanguinet semblent plus proches. De plus, le gradient des biomasses indiquent que

les mois d'hiver (janvier, février, mars) possèdent une biomasse totale plus faible que les mois de mai et juin à l'exception du mois de janvier à Lacanau où la biomasse totale est quasiment équivalente à celle des mois de mai et de juin. La Figure 14-B, ci-dessous, complète ces informations. La communauté phytoplanctonique est représentée le long des axes et les espèces en couleur sont les espèces indicatrices des lacs. En annexe 15 figure le détail des valeurs indicatrices et des probabilités pour les espèces sélectionnées. Ce test (indval du package labdsv de R) permet de calculer la valeur de l'indicateur des espèces comme le produit de la fréquence relative et de la biomasse relative dans notre cas. Si l'on compare ces résultats avec ceux des espèces dont la biomasse contribue le plus à la biomasse totale de chaque échantillon, on constate des résultats bien différents. En effet, sur les résultats vus précédemment (Figure 10, 11, 12 et 13), on se basait seulement sur une seule campagne, dans le cas présent, il s'agit d'identifier les espèces indicatrices sur l'ensemble des campagnes.

Pour le lac de Parentis-Biscarrosse, il y a beaucoup d'espèces indicatrices (26). Il s'agit principalement de cyanobactéries et de chlorophycées puis des diatomées. *Planktothrix agardhii* (PLAAGA) *et Woronichinia naegeliana* (WORNAE) qui sont des cyanobactéries, *Staurastrum planctonicum* (STAPLA) (desmidiées), *Trachelomonas granulosa* (TRAGRA) et *Trachelomonas volvocina* (TRAVOL), deux euglénophycées, sont les espèces les plus indicatrices du lac, c'est-à-dire qu'elles sont retrouvées chaque mois et présentent des biomasses significatives dans l'échantillon.

Le lac d'Hourtin-Carcans présente un nombre plus faible mais important d'espèces indicatrices (9). Ces espèces sont principalement des cyanobactéries et des desmidiées. Contrairement au lac de Parentis-Biscarrosse, il n'y a pas d'espèces retrouvées sur tous les mois de l'étude. Mais en termes de fréquence et de biomasse, *Planktolyngbya limnetica* (PLLLIM) et *Radiocystis geminata* (RAIGEM) (cyanobactéries), *Navicula radiosa* (NAVRAD) (bacillariophycées) et *Euastrum lacustre* (EUALAC) (desmidiées) sont les espèces les plus représentatives du lac.
Les lacs de Cazaux-Sanguinet et de Lacanau, qui sont assez proches dans la Figure 14-A de la représentation de la NMDS, possèdent moins d'espèces indicatrices. Le lac de Cazaux-Sanguinet en possède 4 avec deux diatomées : *Cyclotella ocellata* (CYCOCE) et *Cyclotella comensis* (CYCCOM), une desmidiée *Staurodesmus cuspidatus* (STDCUS) et une xanthophycée *Tetraëdriella jovetti* (TEEJOV). Cependant, la valeur indicatrice pour ces espèces ne dépasse jamais 0,70, ce qui est très loin des valeurs retrouvées dans les deux premiers lacs.
Le lac de Lacanau possède 5 taxons indicateurs avec 3 chrysophycées (*Dinobryon suecicum var. longispinum* (DINSLO), *Ochromonas* (OCHSPX), *Mallomonas* (MALSPX)) et deux diatomées (*Fragilaria* (FRASPX) et *Fragilaria nanana* (FRANAN)), mais de la même manière que pour le lac de Cazaux-Sanguinet, les valeurs indicatrices ne dépassent pas 0,70.

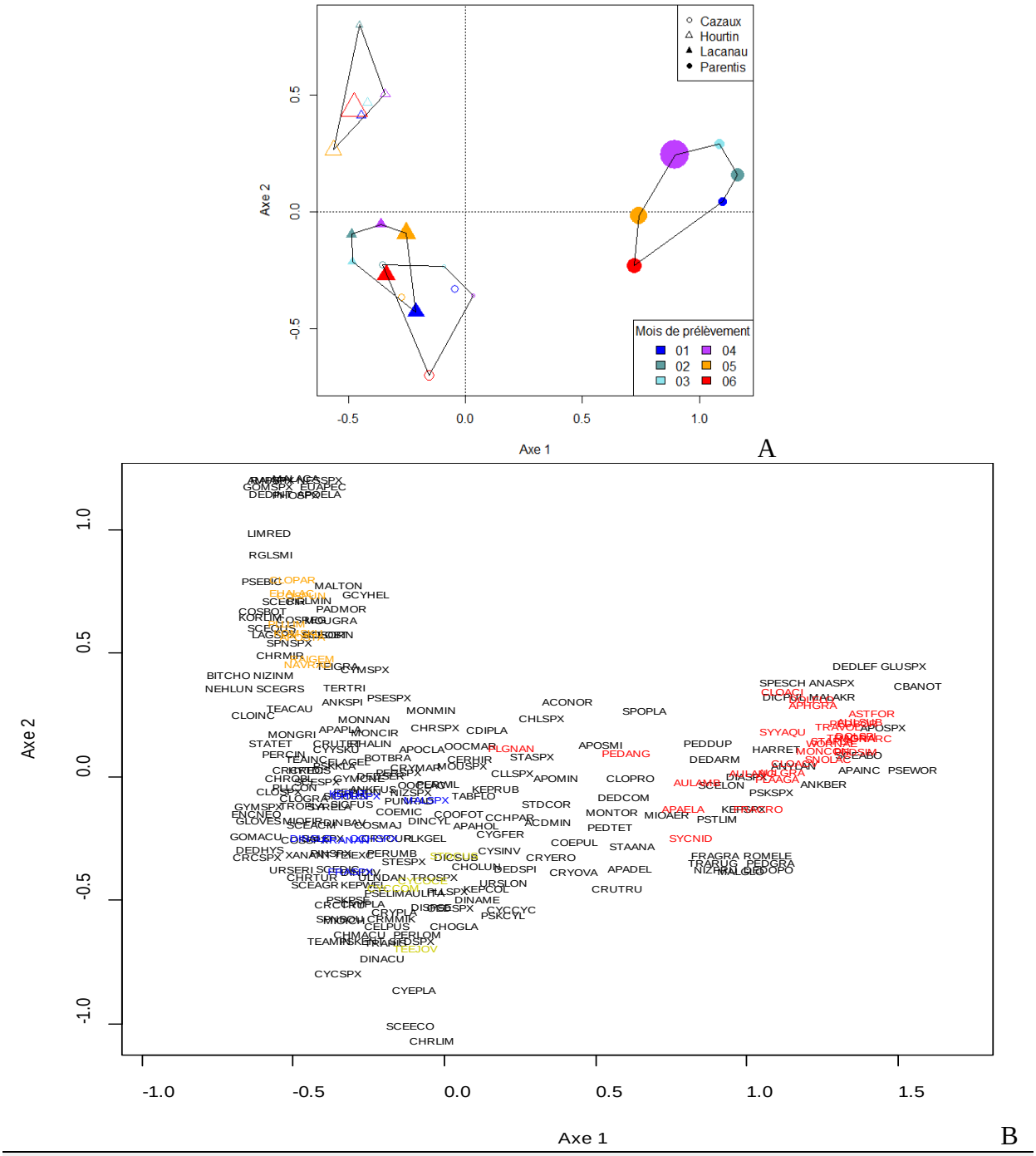


Figure 14 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 1 et 2 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. A : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons pour à chaque campagne. B : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices de chaque lac (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu)

Sur le même modèle que la Figure 14, les graphiques des trois autres axes sont présents en annexe 16, 17, 18. Ils nous permettent de mettre en évidence un léger gradient saisonnie en particulier le long de l'axe 4. Certaines espèces sont principalement retrouvées en hiver (janvier, février et mars par exemple). Sur le lac de Cazaux Sanguinet on retrouve notamment pour le mois de janvier *Planktolyngbya* (PLLSPX), *Oedogonium* (OEDSPX) et *Aulacoseira italica* (AULITA) dans la partie en haut à gauche du graphique et corrélées à l'axe 3. Sur

Hourtin-Carcans pour le même mois, on retrouve *Cosmarium ornatum* (COSORN), *Cosmarium regnellii* (COSREG) et *Scenedesmus quadrispina* (SCEQUS) par exemple.

Le Tableau 6 ci-dessous a été réalisé à partir de la corrélation des axes de la NMDS avec les variables environnementales. On constate que les premiers axes sont corrélés avec des variables plutôt physiques et chimiques alors que les axes 4 et 5 semblent être corrélés à des valeurs plutôt relatives à la météo des lacs.

Tableau 6 : coefficients rho de corrélation de Spearman entre les axes de la NMDS et les paramètres environnementaux et chimiques. Seules les corrélations significatives (p-value < 0.05) sont inscrites

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
T°C					-0,55
T°C_max					-0,41
Vent					
Vent_max					
Précipitation					
Ensoleillement				-0,46	-0,44
Précipitation _J7				0,44	
T°C_J7				-0,41	-0,51
Vent_J7					
Ensoleillement_J7				-0,57	
Secchi			0,48		
T°C_eau				-0,56	
pH					
Conductivité	-0,83				
O_2				0,48	
MES		0,43			
Silice	-0,49				
N_Organique					
N_Minéral					
N_NH4	-0,50	0,43			
N_NO3					
N_NO2					
P_PO4		-0,43			
TP			-0,48		
TN	-0,44				
TN.TP					

Les paramètres environnementaux reliés à l'axe 4 présentent globalement un lien significatif élevé et un gradient opposé pour l'ensoleillement, la température, l'ensoleillement moyen sur 7 jours avant la campagne, et la température de l'eau le jour J. En ce qui concerne l'axe 5, il y a une relation significative négative avec la température, la température maximale durant la journée de campagne l'ensoleillement et les températures sur 7 jours. Effectivement, l'annexe 17 qui renvoie à la représentation de la NMDS avec les axes 4 et 5, permet de visualiser le gradient des saisons le long de l'axe 4.

Les biomasses des mois printaniers (avril, mai et juin) sont globalement supérieures aux mois d'hiver (exception cependant, avec janvier à Lacanau et mars à Parentis-Biscarrosse) et se situent plus dans la partie négative de l'axe 5. Ceci correspond aux résultats obtenus avec la corrélation de Spearman. En effet, il n'est plus à démontrer que la température et l'ensoleillement jouent un rôle majeur dans la croissance du phytoplancton (Sommer *et al.*, 1986). Durant ces mois, la luminosité extérieure tend à augmenter tout comme la température. Également, si les conditions météorologiques restent stables au fil des jours, la communauté sera stable et augmentera en abondance.

Les axes 1 et 2 sont plutôt reliés aux paramètres relatifs à la chimie des eaux. L'axe 1 a une relation significative avec un gradient opposé avec la conductivité, la teneur en silice, l'azote ammoniacal et l'azote total. La Figure 14-B permet de visualiser quels lacs et donc quelles communauté algale, sont reliés à ces paramètres, il s'agit d'Hourtin-Carcans, Lacanau et

Cazaux-Sanguinet. En ce qui concerne l'axe 2 il possède deux relations significatives positives avec les MES et le NH_4^+. A contrario, il possède une relation significative négative avec les orthophosphates (R = -0,43). Le lac de Parentis-Biscarrosse serait donc en partie guidé par la présence de MES et influencé par les concentrations en orthophosphates. Les populations du lac d'Hourtin-Carcans seraient tout aussi influencées par les MES, ce qui est cohérent avec les observations de terrain ou l'on observait une forte turbidité. En ce qui concerne le lac de Lacanau et celui de Cazaux-Sanguinet les nutriments comme l'azote et la silice auraient un impact sur la communauté du phytoplancton.

5.2 Analyse des traits morpho-fonctionnels des espèces du phytoplancton des quatre lacs aquitains

Afin de rester dans la logique des résultats obtenus précédemment, une deuxième NMDS a été réalisée. Les traits significatifs seront mis en évidences par rapport aux différents sites et campagnes. Comme dans la précédente partie, le calcul des distances a été effectué automatiquement par la méthode de Bray-Curtis et réalisée avec le logiciel R. Les 4 premiers axes du barplot (Annexe 19-A) expliquent la majeure partie de la variance. La valeur du stress est bonne (0,07). La représentation graphique de Shepard est présente en annexe 19-B.

La Figure 15 ci-dessous, montre que les traits fixation de l'azote et akinète sont positivement corrélés à l'axe 1. La forme ellipsoïdale est, quant à elle, négativement corrélée à cet axe. Bien que les paramètres soient relativement proches les uns des autres et regroupés au centre de la figure, les lacs sont assez distincts. La forme cymbelloïde et le macrophytoplancton seraient mieux corrélés avec l'axe 2. Également, le Tableau 7 des corrélations de Spearman entre les axes de la NMDS et les paramètres environnementaux nous indique que l'axe 1 est corrélé négativement au disque de Secchi. L'axe 2 est significativement corrélé à la température sur 7 jours avant la campagne, à la température de l'eau, au pH, à la conductivité, à l'azote organique et à l'azote totale.

La Figure 16 permet de mettre en évidence de plus forte corrélation au niveau des traits, malgré une séparation des lacs. En effet, la forme cymbelloïde montre toujours une forte corrélation avec l'axe 2 tout comme le macrophytoplancton. Cette corrélation est négative. Le squelette siliceux serait fortement relié positivement à cet axe. En ce qui concerne l'axe 3, la forme ellipsoïde et cône avec une demi-sphère sont significativement corrélés positivement à cet axe, alors que la forme prisme sur base triangulaire, le mode de vie en colonie et la présence de chlorophylle *b* dans les cellules seraient reliés à l'axe 3 négativement. Le Tableau 7 nous indique que l'axe 3 est corrélé positivement à la température maximale obtenue dans la journée de prélèvement (R = 0,46) et à l'ensoleillement (R=.0,57).

Tableau 7 : coefficients rho de corrélation de Spearman entre les axes de la NMDS basée sur les traits morphologique en fonction des dates et lac, et les paramètres environnementaux et chimiques. Seules les corrélations significatives (p-value < 0.05) sont inscrites

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
T°C				
T°C_max			0,46	
Vent				0,45
Vent_max				0,67
Précipitation				
Ensoleillement			0,57	
Précipitation _J7				
T°C_J7		-0,42		
Vent_J7				0,49
Ensoleillement_J7				
Secchi	-0,43			-0,49
T°C_eau		-0,42		
pH		-0,57		
Conductivité		-0,60		
O_2				
MES				0,51
Silice				
N_Organique		-0,51		0,42
N_Minéral				
N_NH4				
N_NO3				
N_NO2				
P_PO4				
TP				0,43
TN		-0,56		
TN.TP				

La Figure 17 est moins pertinente en termes de corrélation. En effet, on constate que certains traits corrélés à l'axe 2 le sont également à l'axe 4, c'est le cas pour la forme de cône avec une demi-sphère (forte corrélation positive) et le trait cymbelloïde (légère corrélation négative). Certains traits sont cependant reliés significativement à l'axe 4. Il s'agit de la forme de *Ceratium* et de *Staurastrum* et du biovolume > 10 000 µm^3. L'axe 3 dans cette figure ne possède pas particulièrement de traits significatifs le long de l'axe. En effet, la plupart des variables se trouvent regroupées au centre de la figure et légèrement aplaties le long de cet axe. Néanmoins, la forme ellipsoïde ressort ce qui est en accord avec la corrélation positive avec l'ensoleillement. Le Tableau 7 nous indique que l'axe 4 est corrélé positivement au vent, à la vitesse du vent maximale dans la journée de prélèvement, au vent moyen sur 7 jours, aux MES, à l'azote organique, et au phosphore total. L'axe 4 est pareillement corrélé négativement avec le disque de Secchi (R = -0,49).

Les traits reliés aux espèces du lac de Parentis-Biscarrosse sont principalement, les akinètes, et la fixation de l'azote, mais on constate une corrélation avec les filaments, les toxines et les aérotopes. D'autres traits sont reliés à ce lac de manière moins claire, comme les phycobilines, la taille maximale des individus : mésophytoplancton et le biovolume cellulaire compris entre 100 et 1 000 µm^3, la motilité, la présence de gaine, le fait que la cellule soit lisse, la forme cylindre et parallélépipède. Et au niveau de l'axe 2, on voit apparaître les squelettes siliceux, les écailles siliceuses et la forme parallélépipède. Effectivement quand on regarde de plus près la communauté du phytoplancton du lac de Parentis-Biscarrosse, on constate que les traits dominant par rapport aux autres lacs sont globalement ceux indiqué ci-dessus. Par exemple, seules les espèces de cyanobactéries présentes dans ce lac, possèdent la capacité de fixer l'azote atmosphérique et possèdent des akinètes (Annexe 20). Également, 33 espèces réparties sur toutes les dates possèdent le trait aérotope contre 16 pour Hourtin-Carcans, 10 pour Lacanau et 2 pour Cazaux-Sanguinet. De la même manière 54 espèces présentent sur ce lac sont sous forme de filament contre 28 pour le lac d'Hourtin-Carcans, 26 pour celui de Cazaux-Sanguinet et 24 pour celui de Lacanau.

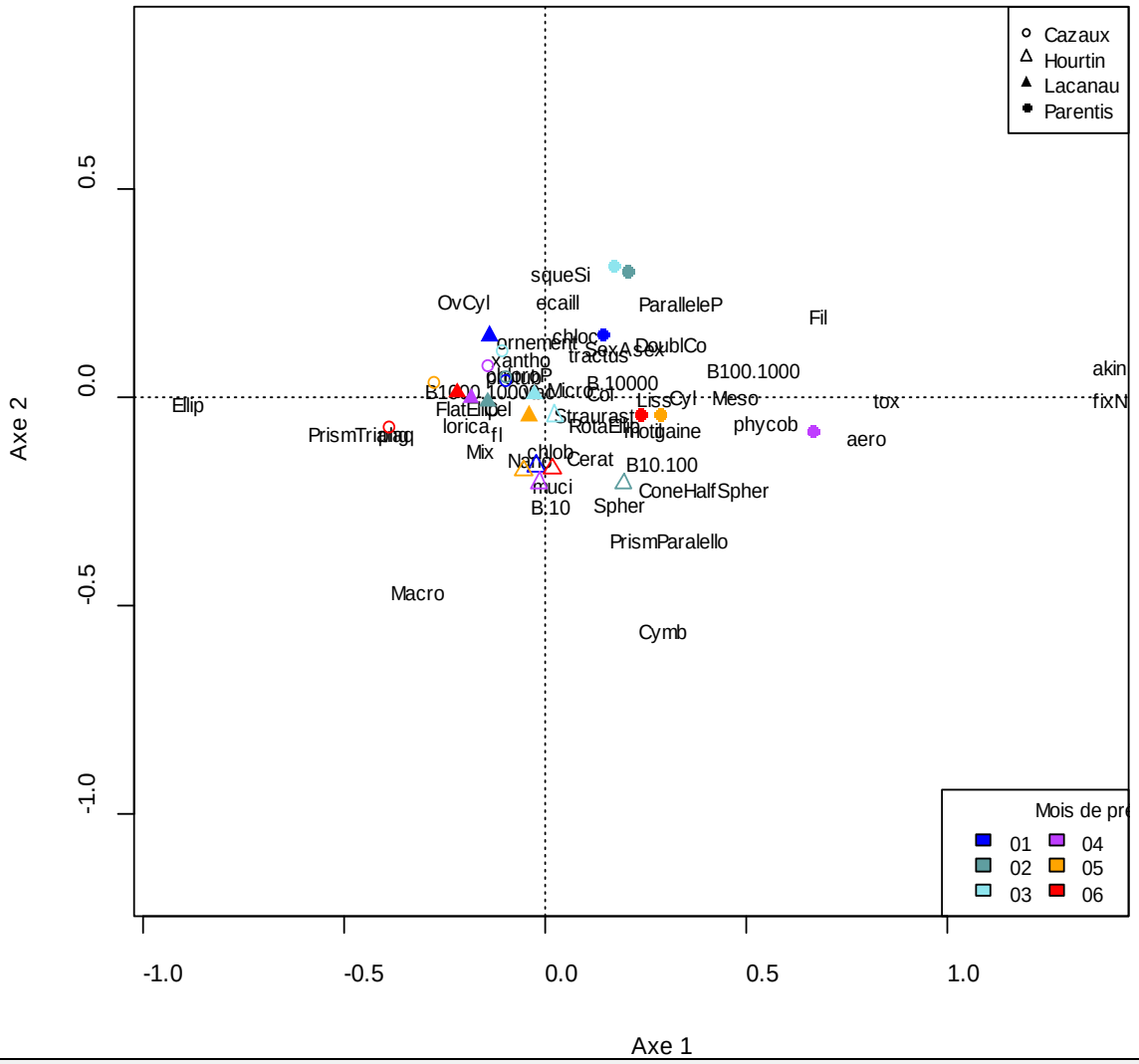


Figure 15 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels des quatre lacs aquitains en 2014 suivant l'axe 1 et 2. Traits : Cel, cellule ; col, colonie ; B, biovolume ; Nano, nanoplancton ; Micro, microphytoplancton ; Meso, mésophytoplancton ; Macro, macrophytoplancton ; Forme PHYTOBS ; motil, motilité ;fl, flagelle ; aero, aérotope ; vac, vacuole contractile ; muci, mucilage ; akin, akinète ; heteroC, heterocyste ; chloroP, chloroplaste ; gaine ;tractus ; lorica ; SqueSi, squelette siliceux ; plaq, plaque siliceuse ; ecaille, écaille ; ornement, ornementation ; protub, protubérance ; Liss, paroi lisse ; chloc, chlorophylle c ; chlob, chlorophylle b ; xantho, xanthophylles ; phycob, phycobilines ; tox, toxines ; fixN, fixation d'Azote ; SexAsex, reproduction sexuée et asexuée

Le Tableau 7 faisant référence aux coefficients de corrélation rhô de Spearman entre les 4 axes de la NMDS et les paramètres environnementaux, indique que l'axe 1 est corrélé négativement avec la transparence de l'eau. Ainsi, les espèces filamenteuses possédant des akinètes, ayant la possibilité de fixer de l'azote et libérer des toxines, ou ayant des aérotopes seraient majoritairement retrouvées dans des eaux de faible transparence, comme c'est le cas dans le lac de Parentis-Biscarrosse. On a effectivement des faibles valeurs du disque de Secchi allant de 1,70 m à 2,80 m de profondeur. Aussi, le lac de Parentis-Biscarrosse est relativement bien relié positivement à l'axe 2 (visible sur la Figure 16), en particulier pour les mois d'hiver (janvier, février et mars). Ainsi, pour l'axe 2, les traits ne sont pas influencés par les températures de l'air et de l'eau. On observe aussi que l'azote ne contribue pas à leur subsistance ou disparition.

D'après la Figure 15, on peut remarquer que les traits du lac d'Hourtin-Carcans, quelle que soit la date, sont la chlorophylle *b*, le nano et macrophytoplancton, les biovolumes inférieur à 10 µm^3 et entre 10 et 100 µm^3, la présence de mucilage, et les trois formes suivantes : cône avec demi-sphère, cymbelloïde et prisme sur base de parallélogramme.

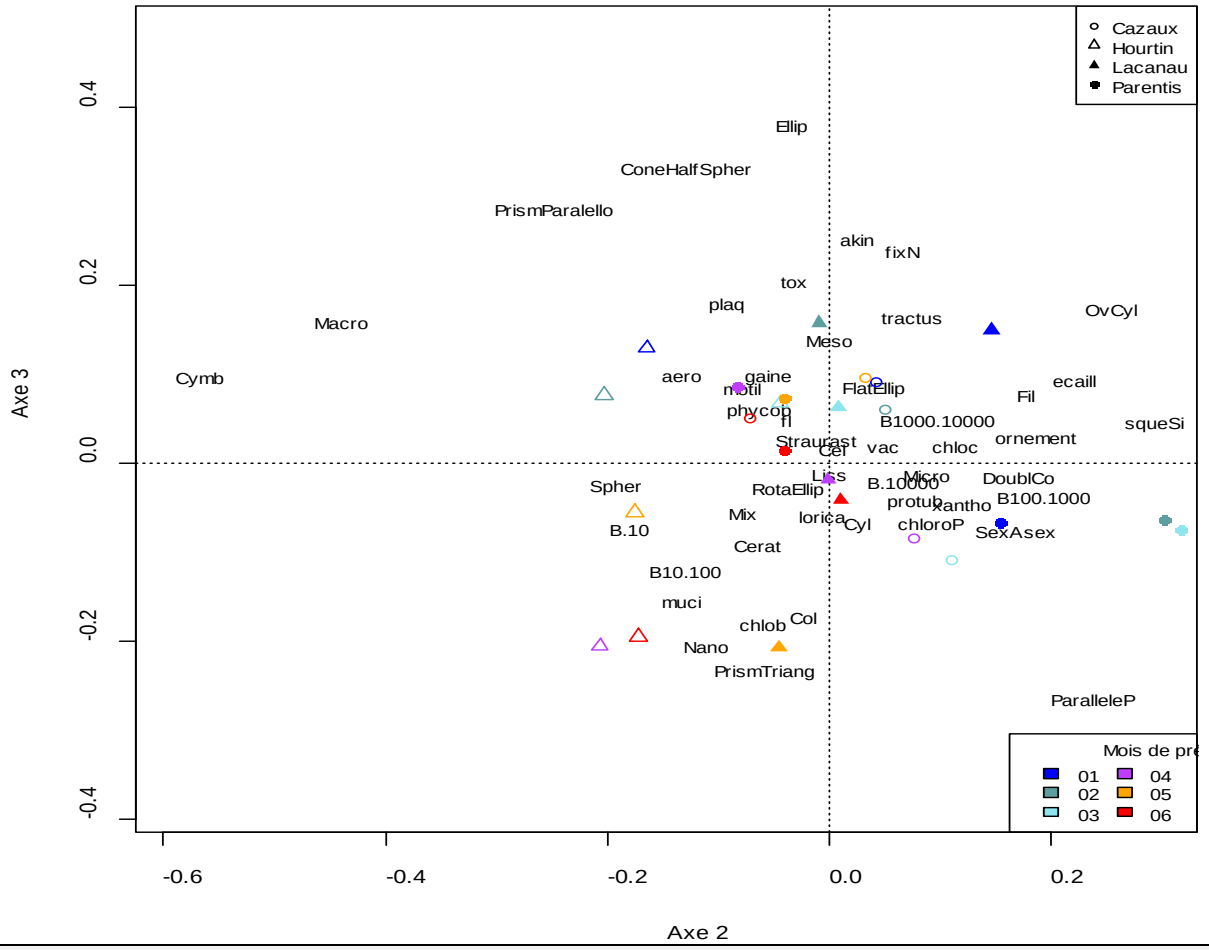


Figure 16 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels du phytoplancton des quatre lacs suivant l'axe 2 et 3

De manière plus précise le lac d'Hourtin-Carcans possède 4 espèces, présentes en janvier, mars, avril et juin dont la taille maximale de l'individu appartient au macrophytoplancton contre 1 pour Cazaux-Sanguinet et Lacanau et aucune pour Parentis-Biscarrosse. La forme cône avec une demi-sphère est seulement représentée par des espèces du lac d'Hourtin-Carcans. Enfin, le mucilage, qui est un trait important que ce soit pour la flottabilité, la protection face au broutage et le stockage des nutriments, est présent sur 77 espèces dans le lac, contre 71 et 70 pour le lac de Lacanau et le lac de Parentis-Biscarrosse et 55 pour le lac de Cazaux-Sanguinet. Malgré ce mucilage, et bien que tous les lacs possèdent un nombre important de petites espèces représentées par un biovolume inférieur à 10 µm^3, le lac d'Hourtin-Carcans en possède le plus avec 31 espèces différentes. La chlorophylle *b* qui semble être corrélée nous confirme que ce lac présente un nombre important de chlorophycées et de desmidiées. De plus, la Figure 16 précise ceci pour les mois d'avril, mai et juin, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus dans

la partie 5.1. Le lac d'Hourtin-Carcans semble être corrélé négativement à l'axe 2 d'après la Figure 15, et d'après le Tableau 7 cet axe est corrélé négativement à la température sur 7 jours avant les prélèvements, la température de l'eau, le pH, la conductivité, l'azote organique, et l'azote totale. Les traits cités seraient influencés par ces paramètres. Sur la Figure 16, ils semblent être corrélés avec l'axe 3 qui relie l'ensoleillement et la température maximale

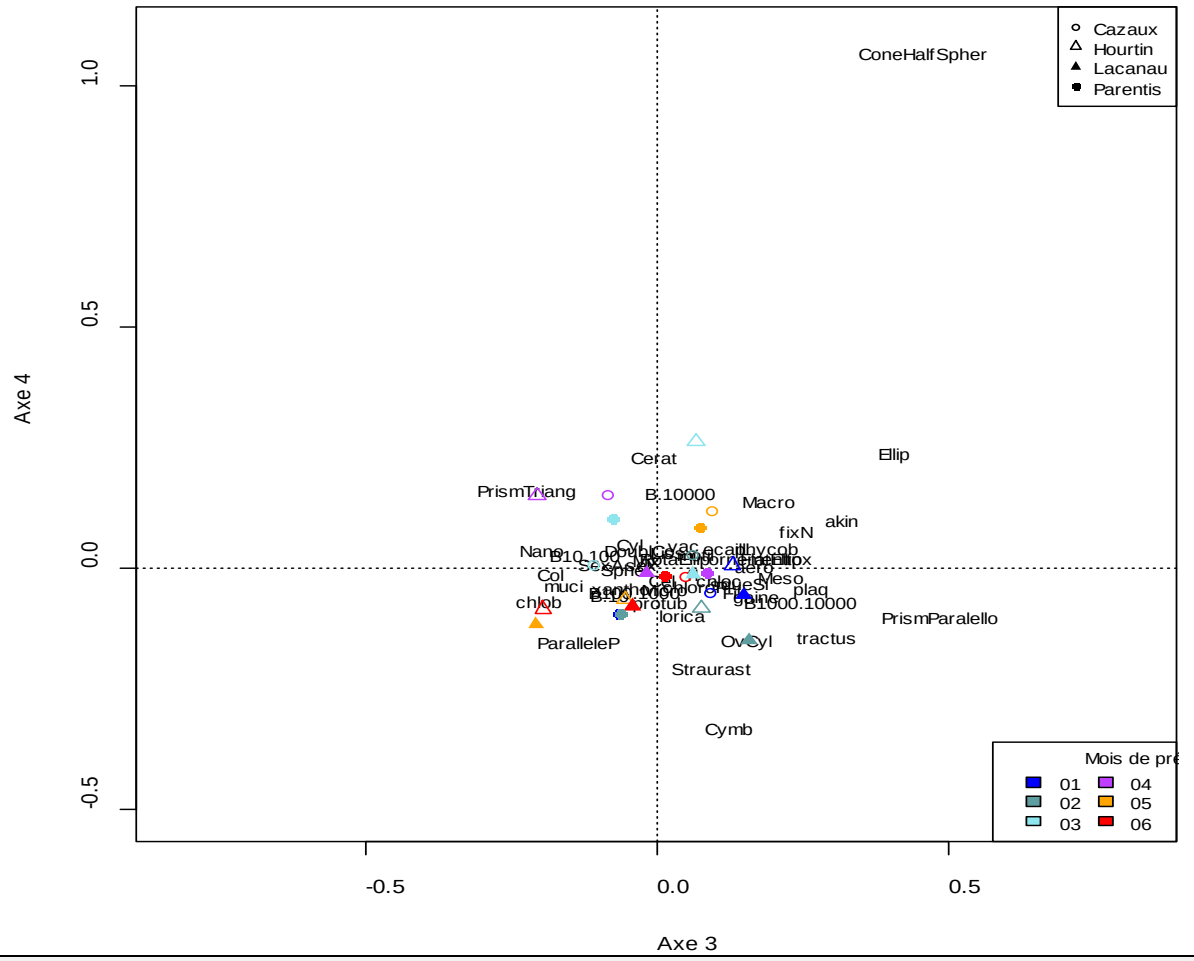


Figure 17 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels des quatre lacs suivant l'axe 3 et 4

Les lacs de Lacanau et de Cazaux-Sanguinet sont plus difficilement identifiables dans les Figure 15, 16 et 17. Il semble que les traits les caractérisant sont clairement moins identifiables que les autres lacs. Quand on y regarde de plus près (Annexe 20), ils partagent des traits communs comme la mixotrophie (93 espèces sur Lacanau et 78 sur Cazaux-Sanguinet), les vacuoles contractiles (19 espèces sur les deux lacs contre 17 pour les deux autres lacs).

On arrive, cependant, à distinguer quelques traits distincts notamment avec la Figure 16 le long de l'axe 3. La présence de protubérances chez certaines espèces a principalement lieu sur le lac de Lacanau avec 114 espèces possédant ce trait sur toutes les campagnes. Le biovolume compris entre 1 000 et 10 000 μm^3 est dominant avec 72 individus contre 67, 65 et 45 pour respectivement Hourtin-Carcans, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse. Et le biovolume supérieur à 10 000 μm^3 qui est aussi dominant mais en plus faible effectif sur le lac de Lacanau

avec 20 individus contre 17 pour Cazaux-Sanguinet et 14 pour Hourtin-Carcans et Parentis-Biscarrosse. L'axe 3 est corrélé positivement à la température maximale de la journée de campagne et à l'ensoleillement ce qui correspond aux mois d'hiver (représentés dans les tons bleu sur la Figure 16). Effectivement, lorsque les températures augmentent ainsi que l'ensoleillement, le phytoplancton croît de manière générale, le biovolume augmente alors.

Pour le lac de Cazaux-Sanguinet, il s'agit du seul lac à posséder des individus de forme ellipsoïdale. De même, il se place juste derrière le lac de Lacanau en termes d'individus possédant des flagelles. En effet, Lacanau possède 93 espèces possédant ce trait, Cazaux-Sanguinet, 73, Hourtin-Carcans, 66 et Parentis-Biscarrosse 58, en particulier, il semble relié à ce trait principalement en juin. Pour la forme d'ellipse plate le lac se place également juste derrière le lac de Lacanau et les mois de janvier, février et mai semblent particulièrement reliés à ce trait. En termes de taille maximale de l'individu, le lac de Cazaux-Sanguinet possède 67 taxons nanophytoplanctoniques différents contre 63 et 61 pour Hourtin-Carcans et Lacanau, et seulement 45 pour Parentis-Biscarrosse. Étant très proche du lac de Lacanau, il est également corrélé à l'axe 3 (majoritairement). La température maximale et l'ensoleillement jouent donc un rôle non négligeable sur ses traits.

6 Discussion

6.1 La communauté phytoplanctonique

Les lacs du littoral aquitains présentent des caractéristiques morphologiques légèrement différentes. Effectivement, les lacs du nord, c'est-à-dire Lacanau et Hourtin-Carcans sont des lacs de faibles profondeurs (< 10 m) alors que ceux du sud, Parentis-Biscarrosse et Cazaux-Sanguinet sont des lacs profonds présentant une stratification thermique bien marquée.

Le premier constat est la différence en termes de richesse. Les deux lacs peu profonds possèdent une richesse nettement supérieure aux lacs profonds (notamment pour le lac de Lacanau). Le lac de Cazaux-Sanguinet possède la plus faible richesse (116 taxons en considérant toute la communauté), abondance et biomasse totale (Tableau 4 et 5). Ceci s'explique par le fait que le lac est considéré comme étant oligo-mésotrophe (Cellamare, 2009), la quantité de nutriments disponibles est donc moins importante que pour les autres lacs.

On peut comparer les successions de ce lac avec le modèle empirique de Sommer *et al.*, (1986). Le modèle érigé résulte de la concertation de nombreux scientifique du PEG (Plankton Ecology Group) sur des données provenant de 24 lacs différents. Ils précisent que ce modèle met en évidence les différents évènements saisonniers agissant sur les communautés phytoplanctoniques mais qu'il reste tout de même une part d'imprévisibilité notamment accentuée par les phénomènes physiques agissant sur le milieu. Ainsi, on constate que, conformément au modèle, durant le milieu et la fin de l'hiver, il y a une dominance des cryptophytes et des diatomées centriques de petites tailles. En effet, sur les 12 espèces de diatomées trouvées en janvier, 8 ont une forme de cylindre. En février, 9 sur les 13 espèces sont cylindriques. Également la Figure 11 montre très bien qu'en janvier et février ce sont ces deux groupes qui sont majoritairement représentés. Le modèle indique par la suite qu'à la fin du printemps, on a une période « d'eau claire », qui fait référence à une biomasse phytoplanctonique très faible due au broutage des petites algues par le zooplancton. Cette phase, nous la voyons plutôt apparaître au mois de mars dans la plupart des lacs. Cependant, le lac de Cazaux-Sanguinet suit relativement bien le modèle puisqu'il atteint son niveau le plus bas de biomasse algale en avril avec 189 µg/l contre 226 µg/l en mars et 574 µg/l en mai. À la suite de cette phase, le modèle prédit une diminution de la prédation face à la diminution de la charge en nourriture dans l'eau. On devrait voir apparaître de manière importante, des cryptophytes comestibles et des algues vertes non comestibles, puis un remplacement des algues vertes par les diatomées de grande taille à cause d'une compétition grandissante pour le phosphore, puis la diminution de la silice induit la croissance des dinoflagellés de grandes tailles et des cyanobactéries. Enfin, la consommation de l'azote conduit à l'épuisement de cette ressource ce qui favoriserait la prolifération des cyanobactéries filamenteuses fixatrices d'azote

atmosphérique. Toutes ces étapes constituent le phytoplancton d'été. Pour le lac de Cazaux-Sanguinet, on ne voit pas toutes les étapes de cette succession, il aurait fallu augmenter la période d'échantillonnage au cours de l'été. On voit cependant la dominance des dinophycées (en particulier de l'espèce *Peridinium umbonatum*) en mai et juin avec une légère augmentation de colonie de cyanobactéries non fixatrices d'azote et mucilagineuses (sauf pour *Pseudanabaena limnetica*), ce qui permet d'être plus résistantes à la pression du broutage (Reynolds, 2007). Dans le cas de notre étude, le modèle s'arrête à cette phase puisque nous n'avons pas, pour le moment, un cycle complet.

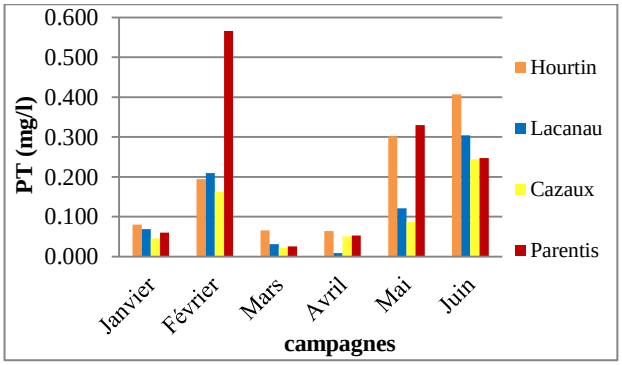


Figure 18 : évolution de la quantité de phosphore brut total (mg/l) des quatre lacs de janvier à juin 2014

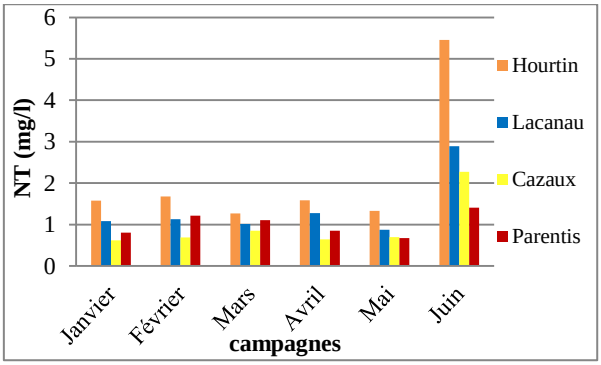


Figure 19 : évolution de la quantité d'azote total (mg/l) des quatre lacs de janvier à juin 2014

Le phosphore et l'azote sont les nutriments indispensables à la croissance du phytoplancton avant le carbone et la silice. Il faut savoir que le phosphore est le principal facteur limitant dans la croissance du phytoplancton. Il participe aussi à la détermination du niveau trophique du milieu aquatique d'après l'O.C.D.E. de 1982, ainsi un milieu eutrophe est caractérisé par des concentrations plutôt élevées.

Sur le lac de Parentis-Biscarrosse, un pic de phosphore a été identifié au mois de février. Ceci peut s'expliquer par le mélange des eaux dû à une stratification thermique non établie. Les lacs de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet sont des lacs monomictiques*, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent qu'une stratification thermique par an. Au mois de février, cette stratification n'est pas encore établie, les eaux sont alors toujours en mouvement ce qui provoque une turbulence sur toute la colonne d'eau et donc une remise en suspension des nutriments. La stratification thermique commence à être visible dès le mois de juin (respectivement entre 7-9 m et 6-8 m de profondeur), ainsi que des déficits d'oxygène dissous, voire des anoxies, vers le fond. Les lacs d'Hourtin-Carcans et de Lacanau sont des lacs de faible profondeur, et polymictiques. Le brassage a lieu plus ou moins perpétuellement suivant les conditions climatiques, ce qui permet une remobilisation des nutriments organiques et ainsi une disponibilité des éléments nutritifs et c'est pourquoi on observe des concentrations en phosphore total et en azote total relativement forte tout au long de la période d'étude.

Également, les conditions climatiques du mois de février ont été relativement mauvaises avec une augmentation des précipitations (> 4 mm sur 7 jours), un vent plus présents et un

ensoleillement faible (Annexes 10 et 11). On peut donc expliquer les faibles valeurs de biomasse sur tous les lacs, malgré une légère augmentation sur celui de Parentis-Biscarrosse, et les fortes valeurs de phosphore dans l'eau. Il convient, par ailleurs, de rappeler que les sources naturelles de phosphore dans l'eau sont les petites quantités qui sont apportées par les précipitations, augmentée par les phosphates provenant de l'altération des minéraux phosphatés, en particulier l'apatite cristalline, comme de fluoropatite et d'hydroxyapatite, et la phosphorite amorphe (Reynolds, 2006).

Tableau 8 : évolution du rapport NT/PT sur chaque lac à chaque mois de l'année 2014

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Parentis-Biscarrosse	13,30	2,14	42,82	16,24	2,03	5,70
Cazaux-Sanguinet	13,65	4,26	39,07	12,74	8,00	9,32
Hourtin-Carcans	19,53	8,64	19,33	24,65	4,40	13,40
Lacanau	15,76	5,40	32,57	144,57	7,20	9,52

Le mois d'avril est caractérisé par un bloom important de cyanobactéries sur le lac de Parentis-Biscarrosse. La biomasse y est très importante (1 324 µg/l en mars et 11 438 µg/l en avril). Elle est due à une espèce, *Aphanizomenon gracile* contribuant à 90 % de la biomasse totale. Ceci peut s'expliquer par une diminution du ratio NT/PT. Quiros *et al.*, (2002), explique que les blooms de cyanobactéries surviennent souvent lors de ratios faibles et que les cellules possédant la capacité de fixer l'azote atmosphérique augmentent dans ces conditions. Le ratio est encore élevé malgré la diminution (Tableau 8). La quantité de nutriments est encore suffisamment présente pour le développement des autres groupes algaux, la quantité de lumière augmente aussi durant ce mois (Annexe 10). Les conditions sont donc réunies pour une bonne croissance. Or, une augmentation d'algues conduit inévitablement à la compétition pour les ressources, d'où un développement du trait « fixation de l'azote atmosphérique ». Mais aussi, au cours de ce mois, nous avons pu constater une importante quantité de pollen à la surface de l'eau, ce qui augmente encore la turbidité du milieu. Il faut donc que les espèces soient capables de s'adapter aux faibles quantités de lumière, ou posséder un facteur permettant de se déplacer dans la colonne d'eau (mucilage, aérotopes, flagelles, vacuoles contractiles). *Aphanizomenon gracile* est capable de se déplacer dans la colonne d'eau mais également de fixer l'azote atmosphérique. En plus de cette cyanobactérie contribuant aux ¾ de la biomasse totale du mois, *Mallomonas* (chrysophycée) contribuant seulement à 2,30 % de la biomasse et *Woronichinia naegeliana* (cyanobactéries) avec 1,16 % de la biomasse, possèdent également le facteur de motilité leur permettant de survivre dans ce milieu riche. Il faut tout de même préciser que la fixation de l'azote atmosphérique n'est pas possible par toutes les espèces de cyanobactéries. En effet, seules *Anabaena*, *Aphanizomenon gracile*, *Dolichospermum flos-aquae* et *Dolichospermum spiroides* sont des cyanobactéries N_2-fixatrices. Globalement il y a toujours quelques-unes de ces espèces présentes en fonction des mois (2 en janvier, février et juin et 3 en mars avril et mai). On constate pareillement, que c'est l'espèce *Aphanizomenon gracile* qui participe au mieux à la biomasse totale pour les mois de mars, avril et mai.

En ce qui concerne l'azote, c'est le lac de Parentis-Biscarrosse qui est toujours inférieur aux autres lacs (Figure 19). On voit clairement que pour ce lac, c'est l'azote qui contrôle la communauté phytoplanctonique.

Pour conclure cette première partie de discussion sur la communauté phytoplanctonique, nous avons constaté que les quantités de phosphore disponible dans l'eau ont considérablement variées depuis 2006. En effet, l'étude réalisée par Cellamare (2009) montre qu'entre le printemps 2006 et l'automne 2007, les concentrations en phosphore total ne dépassaient pas les 50 µg/l dans les quatre lacs. En 2014, les concentrations en phosphore total ont atteint 0,566 mg/l (lac de Parentis-Biscarrosse, annexe 6) soit 566 µg/l. On observe une augmentation moins marquée pour les autres lacs à cette date, puis en mai et juin. Les concentrations d'azote mesurées à l'époque étaient du même ordre de grandeur que celles trouvées aujourd'hui. Les lacs d'Hourtin-Carcans et de Lacanau présentant les concentrations les plus élevées en azote totale. Effectivement, les lacs de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet affichent des concentrations plus faibles et modérées (Figure 19).

6.2 Les traits morpho-fonctionnels

L'analyse de ces traits a été effectuée en prenant en compte toutes les dates. Cela permet d'avoir une première approche globale pour tous les lacs étudiés.

Si l'on regarde de manière générale l'occurrence des traits (Annexe 20), on constate que peu importe le lac et la date, la forme prédominante est l'ellipse rotationnelle. On peut même observer une augmentation légère de ces formes en mai et juin, ce qui s'explique par l'augmentation de la biomasse algale et du nombre d'individus durant cette période.
Les individus sous forme d'une cellule sont le plus souvent trouvés et la proportion de colonie est relativement du même ordre sur les quatre lacs (Cazaux-Sanguinet est légèrement derrière avec seulement 75 individus contre 90 en moyenne pour les trois autres lacs). En revanche pour les filaments il y a clairement une dominance du lac de Parentis-Biscarrosse avec 54 individus retrouvés sous cette forme alors que les autres lacs en possèdent en moyenne 26 seulement. En ce qui concerne les biovolumes, les cellules possédant un biovolume compris entre 100 et 1 000 µm sont les plus fréquemment retrouvées. Au niveau de la taille maximale de l'espèce, il s'agit majoritairement de microphytoplancton. Le macrophytoplancton étant présent dans de très faibles proportions, avec tout de même 4 individus retrouvés sur le lac d'Hourtin-Carcans. Pour le trait relatif à la motilité, il n'y a pas de classe prédominante au cours des mois de prélèvements. Le lac de Lacanau possède le plus d'espèces ayant la capacité de se déplacer dans la colonne d'eau avec un nombre important d'individus possédant des flagelles. (93 sur toute l'étude contre 76 pour Cazaux-Sanguinet, 66 pour Hourtin-Carcans et 58 pour Parentis-Biscarrosse).

Les traits permettant la protection de la cellule sont les gaines, le mucilage, les lorica, les plaques et les écailles siliceuses. Tout d'abord la gaine est souvent retrouvée chez des individus comptés sur le lac d'Hourtin-Carcans. La gaine est un moyen de résister à la prédation car difficile à détériorer. Les graphiques liés à la NMDS des traits morpho-fonctionnels ont mis en évidence la relation avec le lac d'Hourtin-Carcans principalement en février, mais aussi plus subtilement en janvier et mars. Avec le lac de Parentis-Biscarrosse en mai, en avril et en juin. En ce qui concerne le mucilage, les Figure 15 et 16 ont mis en évidence une connexion avec le lac d'Hourtin-Carcans en particulier pour les mois de janvier, avril, mai et juin. Effectivement, ce lac possède plus que les autres lacs, des cellules, colonies ou filaments ayant du mucilage. (77 individus contre 71 et 70 sur Parentis-Biscarrosse et Lacanau et seulement 55 pour Cazaux-Sanguinet). Également, la production de mucilage est améliorée et augmentée lors de longues journées, dans des écosystèmes peu profonds et mixtes où la lumière est importante, ce qui pallie aux manquements d'autres besoins (Reynolds, 2007). L'ensoleillement moyen de la station durant les trois mois où le mucilage est significatif et relativement important. En janvier, il est à 597 joules/cm², dépasse les 2 000 joules/cm² en avril et mai et diminue légèrement en juin. Ainsi, les conditions sont remplies pour pouvoir fabriquer du mucilage chez certaines espèces. De même, Reynolds (2007) décrit le mucilage comme un élément qui permet à la cellule de subsister face à la prédation. Beaucoup d'espèces se développeraient donc très bien dans les environnements eutrophe avec en plus la capacité de régulation de la position dans la colonne d'eau. Le trait mucilage apporte donc de nombreux avantages et semble tout à fait correspondre au type de lac que représente Hourtin-Carcans.

Pour les pigments, la phycobilines est le mieux discriminée car présent uniquement chez les cryptophycées et les cyanobactéries.
Le trait « production de toxines », par les cyanobactéries (uniquement des cyanobactéries ici), est particulièrement intéressant à étudier car les toxines produites sont dangereuses pour l'homme et les animaux. Les efflorescences sont par ailleurs très surveillées sur Parentis-Biscarrosse car comme les résultats des analyses l'ont démontré, la capacité de produire des toxines est très présente sur ce lac et est dominante par rapport aux autres lacs. Ainsi, sur les quatre lacs, 13 espèces différentes ont été répertoriés comme libérant des toxines dans l'eau. Le lac de Parentis-Biscarrosse en possède le plus grand nombre avec 9 espèces différentes, dont *Aphanizomenon gracile*. Cette dernière participe activement à la biomasse totale de la campagne du mois de mars, avril et mai (respectivement 13, 89 et 29 %), puis en mai et juin, l'espèce *Planktothrix agardhii* prend plus d'ampleur avec des biomasses de 36 et 47 %.
La capacité de réaliser les deux modes de reproduction est principalement visible sur les taxons du lac de Lacanau (en grande majorité des diatomées, chlorophycées et chrysophycées). Cependant ce trait se démarque peu de la NMDS réalisée dans les Figure 15, 16 et 17. Il est pourtant très important car les espèces possédant cette capacité peuvent d'adapter aux différentes conditions agissants sur le milieu. La reproduction sexuée conduit à la production

de zygotes et de spores (spore parfois flagellés sous le nom de zoospores (De Reviers, 2009)). La possibilité de fragmentation ou de reproduction végétative est un avantage lorsque l'individus est menacé de broutage, la fragmentation de la colonie ou du filament va ainsi permettre la survie de l'espèce (Beardall *et al.*, 2008).

De manière plus précise, les tests statistiques ont révélés quelques traits importants pour chaque lacs, le tout corrélé à des paramètres environnementaux.
L'observation des principaux traits caractérisant la communauté du lac de Parentis-Biscarrosse (espèces filamenteuses, akinètes, fixation de l'azote atmosphérique, aérotopes) font globalement référence aux groupes des cyanobactéries. Ils caractérisent principalement les mois du printemps soit, avril, mai et juin. De plus la Figure 15 nous a permis de constater qu'ils étaient reliés à l'axe 1 et comme vu dans la partie résultats, on en a déduit que ces traits apparaissaient lorsque le disque de Secchi affichait des valeurs faibles. La turbidité de l'eau peut avoir plusieurs origines, une remise en suspension des sédiments, des blooms de phytoplancton, la forte charge en nutriment par exemple. On a vu dans la première partie de cette discussion que les biomasses augmentaient durant ces périodes. L'eau est donc plus troublée. Des caractéristiques comme les aérotopes permettant de contrôler la flottabilité des espèces, vont particulièrement s'avérer efficace dans ces environnements puisqu'ils vont permettre aux espèces possédant ce trait de se déplacer verticalement dans la colonne d'eau (le lac de Parentis-Biscarrosse étant un lac profond = 20,5 m). Le long de l'axe 2 on a vu que les mois d'hiver (janvier, février et mars) étaient reliés à des traits plus morphologiques (squelette siliceux, écailles en silice et forme de parallélépipède). Cela permet de discriminer des diatomées (largement prédominantes durant ces trois premiers mois avec *Aulacoseira ambigua* correspondant à 18 % de la biomasse totale de janvier, *Aulacoseira subarctica* (37 %) en février et *Asterionella formosa* avec 27 % en mars). On en a déduit grâce à la corrélation de Spearman que ces traits n'étaient pas influencés par l'azote total contenue dans l'eau. Effectivement, ces traits correspondent principalement à des diatomées, et la silice est beaucoup plus importante que l'azote dans un premier temps pour la croissance de ces espèces.
Également, on a vu dans la première partie de la description des résultats que le lac de Parentis-Biscarrosse était caractérisé en avril par une forte participation à la biomasse totale de l'espèce *Aphanizomenon gracile* mais aussi que l'espèce *Planktothrix agardhii* était dominante en termes de biomasse lors de deux mois de l'étude.
Aphanizomenon gracile est une cyanobactérie présente dans le milieu sous forme de filament, ayant un biovolume cellulaire moyen de 240 μm^3, avec une taille maximale de l'individu caractérisé dans le mésophytoplancton et en forme de cylindre, elle possède des aérotopes permettant de monter et descendre dans la colonne d'eau. Comme précisé un peu plus haut, elle est capable de fixer l'azote atmosphérique elle possède des akinètes et peut libérer des toxines. Enfin, c'est une espèce autotrophe ne réalisant que la reproduction asexuée.
Planktothrix agardhii est une cyanobactérie majoritairement présente sous forme de filament et

ayant un biovolume cellulaire moyen de 60 µm^3. La taille maximale de l'individu atteint la classe du microphytoplancton. Tout comme *Aphanizomenon gracile*, la forme de la cellule est un cylindre, elle peut se mouvoir grâce à la possession d'aérotopes. Au contraire, elle ne possède pas de cellules spécialisées mais elle est aussi capable de libérer des toxines. Enfin, c'est une espèce autotrophe ne réalisant que la reproduction asexuée.

Le lac de Cazaux-Sanguinet est le mieux conservé des quatre lacs. Son état a été défini comme oligo-mésotrophe (O.C.D.E., 1982 ; Cellamare, 2009) et constitue une source d'eau potable pour les communes voisines. L'analyse des traits morpho-fonctionnels du phytoplancton des lacs aquitains a révélé qu'il n'y avait pas de traits particulièrement distinct pour ce lac et que du point de vue des communautés il était plus proche de Lacanau. On arrive tout de même à isoler quelques traits qui semblent peser dans la communauté comme la forme ellipsoïdale. De même, il se place juste derrière le lac de Lacanau en termes d'individus possédant des flagelles. On a vu grâce à la corrélation de Spearman que cette forme était corrélée au disque de Secchi. Il est vrai que le lac de Cazaux-Sanguinet possède les plus fortes valeurs pour le disque de Secchi et ainsi une meilleure transparence ce qui permet la croissance d'une cyanobactérie *Cyanocatena planctonica* qui est la seule espèce définie dans cette forme. On a vu précédemment, que le lac était légèrement corrélé à l'axe 3 de la NMDS et que l'ellipse aplatie et le biovolume compris entre 1 000 et 10 000 µm^3 ressortaient notamment, en particulier pour janvier et février. Ces traits seraient influencés par une augmentation de l'ensoleillement mais également de la température maximale. En effet, la forme aplatie permet à la cellule de mieux capter la lumière car elle possède une plus grande surface. Également, les formes flagellées et les organismes de grande taille sont en supériorité dans des milieux bien illuminés (O'Farrell *et al.*, 2007 ; Naselli-Flores et Barone, 2007).
De plus, on a vu dans la première partie de la description des résultats que le lac de Cazaux-Sanguinet était dominé par une dinophycée, *Peridinium umbonatum*, 3 fois durant les 6 mois de l'étude (février, mai et juin). Cette dinophycée domine en février, mai et juin. Cette cellule, ressemblant à une ellipse aplatie dont le biovolume moyen est de 8 854 µm^3 est capable de se mouvoir grâce aux flagelles qu'elle possède. Elle possède des plaques dures, des protubérances ainsi que de l'ornementation sur la paroi cellulaire. Elle est donc plus résistante à la prédation. Elle est capable de mixotrophie mais sa reproduction est seulement asexuée. L'association de flagelles et la mixotrophie donne des avantages à l'espèce. Ce type d'espèces peut se déplacer dans la colonne d'eau lorsque le phosphore inorganique est épuisé, à la recherche de bactéries riche en phosphore (Naselli-Flores & Barone, 2011). Ceci permet à l'espèce de survivre face à la compétition des denrées facilement utilisables mais également, cela permet d'éliminer des concurrents et des consommateurs de phosphore.

Les principaux traits du lac de Hourtin-Carcans sont la chlorophylle *b* (qui est retrouvée chez les chlorophycées, les desmidiées et les euglénophycées), les espèces appartenant au

nanophytoplancton, au macrophytoplancton, les biovolumes inférieur à 10 µm^3 et compris entre 10 et 100 µm^3, la présence de mucilage, et les trois formes suivantes : cône avec une demi-sphère, cymbelloïde et prisme sur base de parallélogramme. Ainsi, d'après la corrélation de Spearman, tous ces traits seraient influencés par la température moyenne de l'air 7 jours avant les prélèvements, la température de l'eau, le pH, la conductivité, l'azote organique, et l'azote totale avec l'axe 2. L'axe 3 met en avant une séparation entre les mois d'hiver (en haut) et les mois du printemps (en bas). Les traits cités plus haut auraient une corrélation négative avec la température maximale et l'ensoleillement alors que la présence d'aérotopes ou de plaques notamment auraient une corrélation positive avec ces paramètres. Le mucilage a un rôle de stockage (Naselli-Flores *et al.*, 2007) et permet, en plus des informations citées ci-dessus, une meilleure circulation des flux de nutriments au sein des cellules en partie à cause de cette séquestration des nutriments (Reynolds, 2007). Mais aussi, le lien observé avec des petits biovolumes, laisse penser que le broutage est peu important dans des environnements riches en nutriments où la température de l'eau est non négligeable.
Également, le lac d'Hourtin-Carcans est dominé en janvier par *Peridinium umbonatum* (dinophycée). Ensuite, le taxon *Tetrastrum triangulare* (chlorophycée) devient dominant les trois derniers mois de l'étude. Cette algue est le plus souvent sous forme de colonie de petite taille, avec un biovolume cellulaire moyen de 65 µm^3 et est de forme cylindrique. Elle possède du mucilage, est capable de mixotrophie et peut réaliser les deux modes de reproduction.

Le lac de Lacanau, plus proche du lac de Cazaux-Sanguinet d'après la Figure 15, possède lui aussi quelques traits qui lui sont propre et qui permettent de le discriminer. La présence de protubérance chez certaines espèces, le biovolume compris entre 1 000 et 10 000 µm^3 est dominant sur ce lac avec 72 taxons et le biovolume supérieur à 10 000 µm^3 qui est aussi dominant mais en plus faible effectif avec 20 taxons seulement. L'axe 3 est corrélé positivement à la température maximale de la journée de campagne et à l'ensoleillement ce qui correspond aux mois d'hiver. Effectivement, lorsque les températures augmentent ainsi que l'ensoleillement, le phytoplancton croît de manière générale, le biovolume augmente alors.
D'après les premiers résultats sur la communauté phytoplanctonique de ce lac. L'espèce *Peridinium umbonatum* (dinophycée) est présente en juin. Un taxon apparaît deux fois et possède une biomasse importante par rapport à la biomasse totale. Il s'agit d'*Ulnaria delicatissima var. angustissima* (bacillariophycées) qui est dominante en janvier et en mars. Il s'agit d'une cellule de forme ovale cylindrique, possédant un grand biovolume moyen de 3 700 µm^3 et donc faisant partie du mésophytoplancton. Comme il s'agit d'une diatomée, elle possède un squelette siliceux. Elle est autotrophe et est capable des deux modes de reproduction. Elle peut être retrouvée attachée à une surface à l'aide d'un tractus ou bien libre dans la colonne d'eau.

Tableau 9 : principaux traits caractérisant les quatre lacs aquitains

Parentis-Biscarrosse	Cazaux-Sanguinet	Hourtin-Carcans	Lacanau
Akinètes, production de toxines, fixation de l'azote atmosphérique, filaments, aérotopes, squelette siliceux, écailles siliceuses, parallélépipède, phycobilines, gaine, cylindre	Ellipsoïde, ellipsoïde aplatie, nanophytoplancton, flagelle, biovolume 1000- 10000 µm^3	Macrophytoplancton, nanophytoplancton, mucilage, biovolume < 10 µm^3 et 10-100 µm^3, chlorophylle *b*, cymbelloïde, prisme sur base de parallélogramme, cône avec demi sphère	Mixotrophe, vacuole contractile, protubérance, biovolume 1000 -10000 µm^3 et > 10000 µm^3

6.3 Ouverture

L'analyse des traits morpho-fonctionnels du phytoplancton ainsi que les successions espèces n'est pas une chose aisée. En effet, le nombre de possibilités est incalculable et de nombreux paramètres jouent sur ces successions. Il serait donc intéressant de diminuer le nombre de traits ou bien d'analyser des traits de même famille par exemple. Dans l'étude de Cellamare *et al.*, (2013), sur les espèces phytoplanctoniques exotiques des lacs aquitains, des traits fonctionnels discriminants des groupes d'algues ont été mis en évidence. Il y avait notamment les phycobiliprotéines permettant de discriminer les cyanobactéries et les cryptophytes. Ou bien le trait de demande en silice qui permet de distinguer les diatomées et les chrysophycées. Ainsi, en faibles quantité, ces traits ont permis une analyse plus fine des résultats. Mais aussi, l'étude de Stanca *et al.*, (2013), se base seulement sur la forme des cellules. Également, la méthode des groupes fonctionnels de Reynolds *et al.*, de 2002 expliquée dans la partie du contexte européen (4.1), serait intéressante à appliquer ici et la combinaison des deux méthodes différentes permettrait d'expliquer différemment la distribution du phytoplancton (Cellamare *et al.*, 2013). En effet, les groupes fonctionnels permettent de séparer les lacs par un niveau de trophie. On verrait peut être une séparation plus nette entre les lacs.

Également, les lacs sont tous, à part le lac de Cazaux-Sanguinet, dans un état trophique de méso à eutrophe et on peut s'apercevoir que les concentrations en phosphore augmentent au fil des années. Ils convient donc de suivre de près ces évolutions et de trouver les sources possibles de pollution. Actuellement, aucune source directe actuelle n'a été mise en évidence, il s'agit de pollutions passées et d'un vieillissement naturel qui a conduit les lacs à ce niveau de trophie. Cependant, dans le cas du lac de Parentis-Biscarrosse il y a peu d'études réalisées sur les impacts des activités de loisir et des plateformes pétrolières. Celles-ci ne sont pourtant pas sans conséquences, puisque les forages pétroliers rejettent de l'eau chaude préalablement utilisée pour le refroidissement des pompes. De plus, il serait intéressant d'analyser plus en détail les teneurs en hydrocarbures.

Enfin, l'étude ne s'intéresse qu'aux 6 premiers mois de l'année, il faut donc continuer l'analyse afin d'observer si la stratification thermique que l'on commence à observer sur le lac de Cazaux-Sanguinet et de Parentis-Biscarrosse a un impact sur la succession des espèces du phytoplancton. Par exemple, voir s'il y a plus d'espèces flagellées (cryptophytes, chrysophycées, dinophycées, euglénophycées, et quelques chlorophycées), qui peuvent ainsi se mouvoir dans toute la colonne d'eau. On peut donc voir augmenter des formes flagellées, mais également des taxons comme *Aulacoseira ambigua* qui sont des diatomées centriques et cylindriques, ce qui augmente la résistance à la sédimentation (Padisák *et al.*, 2003).

Conclusion

Cette étude a permis de montrer que les traits morpho-fonctionnels pouvaient être nombreux et variés. Les successions sont donc très fortement reliées aux paramètres environnementaux. Ce qu'il faut retenir c'est que les lacs sont très différents. Certes les espèces sont assez semblables d'un lac à l'autre mais elles ne sont pas présentes dans les mêmes proportions.
L'étude de la biomasse algale a mis en évidence que les espèces du lac de Parentis-Biscarrosse étaient plus abondantes que dans les autres lacs. Ceci s'explique en partie par la présence de nombreuses colonies et filaments.
Le lac de Cazaux-Sanguinet possède une composition algale changeante au fil des mois. Elle ne possède pas la plus forte richesse taxinomique (il s'agit du lac de Lacanau). Il n'y a pas de problèmes de cyanobactéries toxiques dominantes et la trophie du lac est encore bonne malgré des changements réels dans les concentrations relevées dans l'eau. Les espèces présentes sont souvent flagellées de forme ellipsoïde, la mixotrophie est importante et il la taille des espèces est variable. Ce qui correspond bien au lac puisqu'il est très transparent, avec des valeurs plus faibles en nutriment que les autres lacs et possédant une stratification thermique.
Le lac d'Hourtin-Carcans est fortement corrélé à des espèces de chlorophycées, de desmidiées et d'euglénophycées, avec des formes relativement petites et où le mucilage prend une place importante. Cela signifie que la prédation est présente et que malgré le stockage des nutriments possibles par le mucilage, les constantes variations de ceux-ci affectent les espèces.
Le lac de Lacanau possède la plus forte richesse en termes de taxon. Cette richesse est en partie due aux nutriments toujours présents en grandes quantité et à un mélange presque constant. Malgré cet apport de nutriments beaucoup d'espèces pratiquent la mixotrophie. Également, la présence de protubérance sur des espèces de ce lac laisse penser que la prédation y est importante.

Il serait donc intéressant d'évaluer l'impact du broutage sur le phytoplancton des quatre lacs. Sommer *et al.,* 1986 a décrit la succession théorique des communautés algales au cours du temps et le zooplancton ainsi que la communauté amphihaline qui participent au contrôle des population du phytoplancton.

Le fichier de traits que j'ai pu réaliser durant mon stage sera implémenté dans la base de données des lacs aquitains afin qu'il soit plus accessible mais aussi amélioré et complété.
Enfin, ce stage m'aura beaucoup apportée, tant d'un point de vue personnel que professionnel. Tout d'abord, j'ai pu me familiariser avec les statistiques en me formant à l'utilisation du logiciel R. Mais aussi, j'ai pu améliorer mon sens critique et analytique face à des raisonnements écologiques. Pour finir, le déroulement général du stage, l'ambiance du domaine de la recherche et les problématiques reliées à l'étude du phytoplancton m'ont confortée dans l'idée que je me fais de mon avenir professionnel.

Bibliographie

Agence de l'eau Adour-Garonne, 2014. Le suivi des lacs du bassin Adour-Garonne, pp 15.

Bartram, J., Carmichael, W.W., Chorus, I., Jones, J. and Skulberg, O.M., 1999. Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management, WHO, New York, pp 400.

Beardall, J., Allen, D., Bragg, J., Finkel, Z.V., Flynn, K.J., Quigg, A., Rees, T.A.V., Richardson, A. and Raven, J.A., 2009. Allometry and stoichiometry of unicellular, colonial and multicellular phytoplankton. New Phytologist. 181, 295-309.

Bourrelly, P., 1968. Tome II : Les algues jaunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées, N. Boubée & Cie ed. Boubée, Paris.

Bourrelly, P., 1970. Tome III : Les algues bleues et rouges. Les Eugléniens, Péridiniens et Cryptomonadines, N. Boubée & Cie ed. Boubée, Paris.

Bourrelly, P., 1990. Tome I : Les algues vertes, N. Boubée et Cie ed. Boubée, Paris.

Burylo, M., 2010. Relations entre les traits fonctionnels des espèces végétales et leurs fonctions de protection contre l'érosion dans les milieux marneux restaurés de montagne.Thèse, Université de Grenoble.

Cellamare, M., 2009. Évaluation de l'état écologique des plans d'eau Aquitains à partir des communautés de producteurs primaires. Thèse, Université Bordeaux 1.

Cellamare, M., de Tezanos Pinto, P., Leitão, M., Coste, M., Boutry, S. and Haury, J., 2013. Using functional approaches to study phytoplankton communities in a temperate region exposed to tropical species dispersal. Hydrobiologia. 702, 267-282.

Chisholm, S.W., 1995. The iron hypothesis: Basic research meets environmental policy. Reviews of Geophysics. 33, 1277-1286.

Circulaire « surveillance » DCE 2006/16, 13 juillet 2006. Document de cadrage pour la constitution et la mise en oeuvre du programme de surveillance (contrôle de surveillance, contrôles opérationnels, contrôles d'enquête et contrôles additionnels) pour les eaux douces de surface (cours d'eau, canaux et plans d'eau). Direction de l'eau, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 39 p.

Clarke, K.R., 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. Australian Journal of Ecology. 18, 117-143.

De Reviers, B., 2002. Biologie et phylogénie des algues : t.1, Belin, Paris.

De Reviers, B., 2003. Biologie et phylogénie des algues : t.2, Belin, Paris.

Druart, J.C. and Balvay, G., 2009. Le lac d'Annecy et son plancton, Quae, Versailles.

Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T. and Falkowski, P., 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. Science. 281, 237-240.

Fraisse, S., 2013. Structure de la communauté phytoplanctonique des fleuves côtiers en réponse aux contraintes hdrodynamiques : une approche basée sur les traits morpho-fonctionnels. Thèse, Université Européenne de Bretagne.

Géolandes., avril 2008. Mise en Place d'un S.A.G.E. sur le bassin versant des étangs littoraux Born et Buch. Phase Préliminaire. Rapport de présentation du projet (Emergence, territoire, enjeux, programme), pp 66.

Gogin, S., 2013. Distribution spatio-temporelle des cyanobactéries dans le lac de Parentis-Biscarrosse. Mémoire de Master 2 Pro - Ecotoxicologie, Chimie de l'Environnement. Université Bordeaux 1. Irstea Bordeaux.

Hillebrand, H., Dürselen, C.D., Kirschtel, D., Pollingher, U. and Zohary, T., 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. Journal of Phycology 35, 403-424.

Huber Pestalozzi, G. and Thienemann, A., 1974. Das phytoplankton des susswassers systematik und biologie: 7 teil, 1.Hälfte, E. Schweizerbart'sche verlagsbuchhandlung ed., Stuttgart, DEU.

Izaguirre, I., Allende, L., Escaray, R., Bustingorry, J., Pérez, G. and Tell, G., 2012. Comparison of morpho-functional phytoplankton classifications in human-impacted shallow lakes with different stable states. Hydrobiologia. 698, 203-216.

Jiang, L., Schofield, O.M.E. and Falkowski, P.G., 2005. Adaptive evolution of phytoplankton cell size. American Naturalist. 166, 496-505.

John, D.M., Whitton, B.A. and Brook, A.J., 2011. The freshwater algal flora of the British Isles: an identification guide to freshwater and terrestrial algae. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.

Kruk, C., Mazzeo, N., Lacerot, G. and Reynolds, C.S., 2002. Classification schemes for phytoplankton: A local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement. Journal of Plankton Research. 24, 901-912.

Kruk, C., 2010. Morphology Captures Function in Phytoplankton. A Large-Scale Analysis of Phytoplankton Communities in Relation to their Environment. Thesis, Wageningen University.

Kruk, C., Huszar, V.L.M., Peeters, E.T.H.M., Bonilla, S., Costa, L., LüRling, M., Reynolds, C.S. and Scheffer, M., 2010. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. Freshwater Biology. 55, 614-627.

Kruk, C. and Segura, A.M., 2012. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. Hydrobiologia. 698, 191-202.

Laplace-Treyture, C., Barbe, J., Dutartre, A., Druart, J.C., Rimet, F. and Anneville, O., 2009. Protocole standardisé d'échantillonnage, de conservation, d'observation et de dénombrement du phytoplancton en plan d'eau pour la mise en œuvre de la DCE : version 3.3.1. pp. 44.

Litchman, E. and Klausmeier, C.A., 2008. Trait-based community ecology of phytoplankton. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2008. 39:615–39

Litchman, E., de Tezanos Pinto, P., Klausmeier, C.A., Thomas, M.K. and Yoshiyama, K., 2010. Linking traits to species diversity and community structure in phytoplankton. Hydrobiologia. 653, 15-28.

Morabito, G., Oggioni, A., Caravati, E. and Panzani, P., 2007. Seasonal morphological plasticity of phytoplankton in Lago Maggiore (N. Italy). Hydrobiologia. 578, 47-57.

Naselli-Flores, L. and Barone, R., 2007. Pluriannual morphological variability of phytoplankton in a highly productive Mediterranean reservoir (Lake Arancio, Southwestern Sicily). Hydrobiologia. 578, 87-95.

Naselli-Flores, L., Padisák, J. and Albay, M., 2007b. Shape and size in phytoplankton ecology: Do they matter? Hydrobiologia. 578, 157-161.

Naselli-Flores, L. and Barone, R., 2011. Fight on plankton! Or, phytoplankton shape and size as adaptive tools to get ahead in the struggle for life. Cryptogamie, Algologie. 32, 157-204.

NF EN 15204, 2006. Qualité de l'eau, Norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée (méthode Utermöhl), AFNOR, pp 39.

O.C.D.E., 1982. Eutrophisation des eaux : méthode de surveillance, d'évaluation et de lutte. Organisation de Coopération et de Développement Economiques, Paris.

O'Farrell, I., de Tezanos Pinto, P. and Izaguirre, I., 2007. Phytoplankton morphological response to the underwater light conditions in a vegetated wetland. Hydrobiologia. 578, 65-77.

Padisák, J., Soróczki-Pintér, É. and Rezner, Z., 2003. Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton - An experimental study. Hydrobiologia. 500, 243-257.

Padisák, J., Crossetti, L.O. and Naselli-Flores, L., 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. Hydrobiologia. 621, 1-19.

Quirós, R., 2002. The nitrogen to phosphorus ratio for lakes: A cause or a consequence of aquatic biology?, Fernandez Cirelli and G. Chalar Marquisa ed. CYTED XVII, Centro de Estudios Transdiciplinarios del Agua, Buenos Aires, Argentina, pp 172.

Rakocevic, J., 2012. Summer aspect of phytoplankton communities in some Montenegrin lakes: Are there changes after more than two decades? Archives of Biological Sciences. 64, 745-755.

Raven, J.A., Finkel, Z.V. and Irwin, A.J., 2005. Picophytoplankton: Bottom-up and top-down controls on ecology and evolution. Vie Et Milieu-Life and Environment. 55, 209-215.

Reynolds, C.S., 1980. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. Holarctic Ecology. 3, 141-159.

Reynolds, C.S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L. and Melo, S., 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. Journal of Plankton Research. 24, 417-428.

Reynolds, C., 2006. Ecology of phytoplankton, Cambridge University Press, Cambridge, GBR.

Reynolds, C.S., 2007. Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: facultative responses to the environment. Hydrobiologia. 578, 37-45.

Rolland, A., 2009. Dynamique et diversité du phytoplancton dans le réservoir Marne (bassin versant de la Seine). Thèse, Université de Savoie, pp. 262.

Salmaso, N., 2002. Ecological patterns of phytoplankton assemblages in Lake Garda: Seasonal, spatial and historical features. Journal of Limnology. 61, 95-115.

Salmaso, N. and Padisák, J., 2007. Morpho-Functional Groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). Hydrobiologia. 578, 97-112.

S.A.G.E. 2004. Lacs Médocains: Etat des lieux. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, Hourtin.

S.A.G.E. 2005a. Territoire du SAGE des Lacs Médocains : Etude de la qualité des eaux superficielles - Année 2004. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, Hourtin.

S.A.G.E. 2005b. Lacs Médocains: Etat des lieux. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, Hourtin.

Sieburth, J.M., Smetacek, V. and Lenz, J., 1978. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnology and Oceanography. 23(6), 1256-1263.

Sommer, U., Gliwicz, Z.M., W., L. and A., D., 1986. PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. Archives of hydrobiology. 106, 433-471.

Stanca, E., Cellamare, M. and Basset, A., 2012. Geometric shape as a trait to study phytoplankton distributions in aquatic ecosystems. Hydrobiologia. 701, 99-116.

Stanković, I., Vlahović, T., Gligora Udovič, M., Várbíró, G. and Borics, G., 2012. Phytoplankton functional and morpho-functional approach in large floodplain rivers. Hydrobiologia. 698, 217-231.

Sun, J. and Liu, D.Y., 2003. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. Journal of Plankton Research. 25, 1331-1346.

Verdy, A., Follows, M. and Flierl, G., 2009. Optimal phytoplankton cell size in an allometric model. Marine Ecology Progress Series. 379, 1-12.

Violle, C., Navas, M.L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I. and Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! Oikos. 116, 882-892.

Weithoff, G., 2003. The concepts of 'plant functional types' and 'functional diversity' in lake phytoplankton - A new understanding of phytoplankton ecology? Freshwater Biology. 48, 1669-1675.

Lien internet:

Guiry, M.D. & Guiry, G.M., 2014. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; Recherche le 23 Avril 2014

Jahn, R. & Kusber, W.-H., 2005. AlgaTerra Information System [online]. Botanic Garden and Botanical Museum Berlin-Dahlem, Freie Universität Berlin, http://www.algaterra.org; Recherche le 23 avril 2014

Portail SIE, données exportées en mars (2013). Fiche lac, http://adour-garonne.eaufrance.fr/lac; Recherche le 30 mars 2014

Spaulding, S., and Edlund, M., 2008. Diatoms of the United States, http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Nitzschia; Recherche le 04 Juin 2014

State Reservoir Administration of Saxony (Germany)., 2014. External Quality Assessment Trials Phytoplankton. http://www.planktonforum.eu/index.php?id=2&no_cache=1&L; Recherche le 23 avril 2014

Encyclopedia of Life., 2014. http://www.eol.org. Recherche le 23 avril 2014

Liste des figures

Figure 1 : logo d'Irstea _ source: Irstea.fr 5
Figure 2 : logo de l'équipe Carma. Source : Irstea 5
Figure 3 : localisation géographique des quatre plans d'eau aquitains. Source : Google Earth ... 9
Figure 4 : photographies des quatre lacs aquitains prises en août 2014, A : Parentis-Biscarrosse ; B : Cazaux-Sanguinet ; C : Hourtin-Carcans ; D : Lacanau. Source : personnelle 11
Figure 5 : tableau récapitulatif des traits identifiés par Reynolds *et al.*, (2002) : « trait-separated functional groups of phytoplankton » 16
Figure 6 : classification morpho-fonctionnelle établie par Salmaso et Padisák, (2007) : « morpho-functional groups (MFG) » 17
Figure 7 : classification des groupes morpho-fonctionnels par Kruk *et al.*, 2010 et Kruk *et al.*, 2012. A gauche, le détail des groupes et à droite, la classification 18
Figure 8 : formes géométriques utilisées pour décrire le phytoplancton. Source: logiciel de comptage PHYTOBS 24
Figure 9 : espèces du phytoplancton présentant des traits morphologiques particulier. Source : Laplace-Treyture, 2014. A : *Dictyospharium pulchellum* avec tractus (x1000). B : *Trachelomonas hispida* avec protubérances au microscope à balayage. C : *Chromulina* avec flagelles (x1000). Source : Laplace-Treyture, 2014. 26
Figure 10 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de la biomasse phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Parentis-Biscarrosse 27
Figure 11 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de la biomasse phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Cazaux-Sanguinet 28
Figure 12 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de l'abondance phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac d'Hourtin-Carcans 29
Figure 13 : évolution des grands groupes algaux exprimés en % de l'abondance phytoplanctonique totale de janvier à juin 2014 sur le lac de Lacanau 30
Figure 14 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 1 et 2 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. A : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons pour à chaque campagne. B : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices de chaque lac (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu) 33
Figure 15 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels des quatre lacs aquitains en 2014 suivant l'axe 1 et 2. Traits : Cel, cellule ; col, colonie ; B, biovolume ; Nano, nanoplancton ; Micro, microphytoplancton ; Meso, mésophytoplancton ; Macro, macrophytoplancton ; Forme PHYTOBS ; motil, motilité ;fl, flagelle ; aero, aérotope ; vac, vacuole contractile ; muci, mucilage ; akin, akinète ; heteroC, heterocyste ; chloroP, chloroplaste ; gaine ;tractus ; lorica ; SqueSi, squelette siliceux ; plaq, plaque siliceuse ; ecaille,

écaille ; ornement, ornementation ; protub, protubérance ; Liss, paroi lisse ; chloc, chlorophylle c ; chlob, chlorophylle b ; xantho, xanthophylles ; phycob, phycobilines ; tox, toxines ; fixN, fixation d'Azote ; SexAsex, reproduction sexuée et asexuée 37
Figure 16 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels du phytoplancton des quatre lacs suivant l'axe 2 et 3 38
Figure 17 : graphique de la NMDS appliquée aux traits morpho-fonctionnels des quatre lacs suivant l'axe 3 et 4 39
Figure 18 : évolution de la quantité de phosphore brut total (mg/l) des quatre lacs de janvier à juin 2014 42
Figure 19 : évolution de la quantité d'azote total (mg/l) des quatre lacs de janvier à juin 2014 42

Liste des tableaux

Tableau 1 : code couleur et description des différents groupes algaux. Source : Rolland (2009), Cellamare (2009), Druart (2009), De Reviers (2003), John *et al.*, (2011) 7
Tableau 2 : caractéristiques générales des lacs du littoral aquitains. Source : Cellamare (2009), Gogin (2013) 10
Tableau 3 : classification du phytoplancton à partir de la nomenclature de Sieburth *et al*,. (1978). Source : Reynolds (2006) 24
Tableau 4 : richesse taxinomique des quatre lacs pour chaque campagne de prélèvement en 2014 27
Tableau 5 : biomasse totale de chaque lac pour chaque campagne de prélèvement en 2014 en éliminant les espèces sans biovolume et indéterminées 31
Tableau 6 : coefficients rho de corrélation de Spearman entre les axes de la NMDS et les paramètres environnementaux et chimiques. Seules les corrélations significatives (p-value < 0.05) sont inscrites 34
Tableau 7 : coefficients rho de corrélation de Spearman entre les axes de la NMDS basée sur les traits morphologique en fonction des dates et lac, et les paramètres environnementaux et chimiques. Seules les corrélations significatives (p-value < 0.05) sont inscrites 36
Tableau 8 : évolution du rapport NT/PT sur chaque lac à chaque mois de l'année 2014 43
Tableau 9 : principaux traits caractérisant les quatre lacs aquitains 49

Liste des annexes

Annexe 1 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Parentis-Biscarrosse . 58

Annexe 2 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Cazaux-Sanguinet 59

Annexe 3 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac d'Hourtin-Carcans..... 60

Annexe 4 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Lacanau 61

Annexe 5 : tableau des campagnes de mesures et des prélèvements sur les 4 lacs..... 62

Annexe 6 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac de Parentis-Biscarrosse sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)..... 62

Annexe 7 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac Cazaux-Sanguinet sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)..... 62

Annexe 8 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac d'Hourtin-Carcans sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)..... 63

Annexe 9 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac de Lacanau sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)..... 63

Annexe 10 : tableau résumé de l'ensemble des données météorologiques quotidiennes ou sur 7 jours récupérées sur le site internet de Météo France pour le lac de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet..... 64

Annexe 11 : tableau résumé de l'ensemble des données météorologiques quotidiennes ou sur 7 jours récupérées sur le site internet de Météo France pour le lac d'Hourtin-Carcans et de Lacanau 64

Annexe 12 : tableau des traits morpho-fonctionnels présents dans le tableau de référence listés en colonne 65

Annexe 13 : liste des espèces du phytoplancton identifiées dans les quatre lacs aquitains pendant toute la période d'étude (2014)..... 65

Annexe 14 : A : barplot représentant les valeurs de stress de la NMDS de la communauté phytoplanctonique. B : graphique de Shepard à 5 dimensions 72

Annexe 15 : espèces indicatrices pour chaque lac avec la valeur indicatrice et la probabilité (<0.05)..... 72

Annexe 16 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 1 et 2 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. Projection des

espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu)..... 73

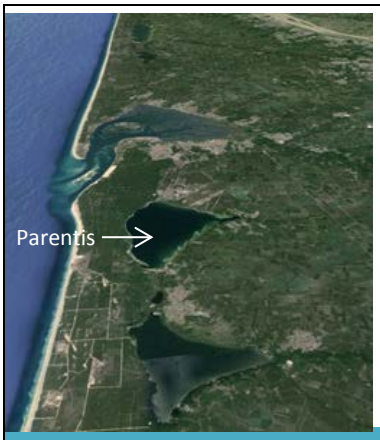
Annexe 17 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 3 et 4 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. C : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons à chaque campagne. D : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices de chaque lac (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu). E : projection des espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés 74

Annexe 18 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 4 et 5 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. F : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons pour chaque date. G : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices à chaque campagne (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu). H : projection des espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés..... 75

Annexe 19 : A : barplot représentant les valeurs de stress de la NMDS des traits représentant la communauté phytoplanctonique. B : graphique de Shepard à 4 dimensions..... 77

Annexe 20 : nombre d'espèce pour chaque lac, toutes dates confondues possédant les traits utilisés pour les tests statistiques. 77

Annexe 1 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Parentis-Biscarrosse



Localisation	
Origine	Lac naturel
Hydroécorégion	Landes (21)
Département	Landes (40)
Communes riveraines	Biscarosse au Nord, Parentis à l'Est, Gaste au Sud-Est, Sainte-Eulalie au Sud
Latitude	N 44°20'41"
Longitude	O 001°10'49"
Coordonnées du point le plus profond	N 44°20'41,4", O 001°10'49,2"
Morphologie	
Forme de la cuvette du plan d'eau	Mixte : Lacs ayant à la fois une zone profonde stratifiée stable (monomictiques ou dimictiques) et une zone littorale étendue, la cuvette pouvant être symétrique ou asymétrique
Type de plan d'eau	N9 - Lac profond du bord de l'Atlantique
Type de mélange	Monomictique*
Altitude (m)	19
Superficie (km²)	35.4
Superficie du bassin versant (km²)	275
Profondeur maximale	20.5
Profondeur moyenne	6.7
Volume (millions de m^3)	250
Volume annuel entrant (millions de m^3)	255
Taux de renouvellement annuel	1.02
Distance de l'océan (centre du lac en km)	8.69
Type de substrat	Sableux
Principaux affluents	Canal Nord ; Craste de Checoc ; Ruisseau du Nasseys ; Ruisseau du Moulin d'Esley
Usages	
Usages du plan d'eau	Baignade, voile, motonautisme, camping, pêche et usage industriel avec une exploitation pétrolière
Etat du plan d'eau	
Etat trophique (selon l'O.C.D.E.)	Eutrophe
Etat écologique*	Médiocre
Etat biologique*	Médiocre
Etat physico-chimique*	Moyen
Etat chimique*	Bon
Remarques	
Efflorescences de cyanobactéries fréquentes	

* Selon le SIE Adour-Garonne et la code Sandre.

Source : Agence de l'eau Adour Garonne ; Thèse de Maria Cellamare (2009). SAGE bassin versant des étangs littoraux Born et Buch (Préliminaire) (2008). Carte positionnant le point le plus profond : Julien Chabanne

Annexe 2 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Cazaux-Sanguinet

Localisation	
Origine	Lac naturel
Hydroécorégion	Landes (21)
Département	Landes (40) et Gironde (33)
Communes riveraines	La Teste-de-Buch au Nord-Ouest en Gironde, Sanguinet et Biscarosse dans les Landes
Latitude	N 44°29'30"
Longitude	O 001°09'00"
Coordonnées du point le plus profond	N 44°29'26,7'', O 001°10'50,1''
Morphologie	
Forme de la cuvette du plan d'eau	Mixte : Lacs ayant à la fois une zone profonde stratifiée stable (monomictiques ou dimictiques) et une zone littorale étendue, la cuvette pouvant être symétrique ou asymétrique
Type de plan d'eau	N9 - Lac profond du bord de l'Atlantique
Type de mélange	Monomictique*
Altitude (m)	20
Superficie (km²)	48.29
Superficie du bassin versant (km²)	200
Profondeur maximale	23
Profondeur moyenne	8.6
Volume (million de m³)	500
Volume annuel entrant (million de m³)	120
Taux de renouvellement annuel	0.23
Distance de l'océan (centre du lac en km)	7.5
Type de substrat	Sableux
Principaux affluents	Ruisseau de la Gourgue
Usages	
Usages du plan d'eau	Baignade, planche à voile, canotage et motonautisme, pêche et chasse au gibier d'eau
Etat du plan d'eau	
Etat trophique (selon l'O.C.D.E.)	Oligo-mésotrophe
Etat écologique*	Bon
Etat biologique*	Bon
Etat physico-chimique*	Bon
Etat chimique*	Bon
Remarques	
Source d'eau potable et présence d'une base militaire sur la rive nord du lac	

* Selon le SIE Adour-Garonne et la code Sandre.

Source : Agence de l'eau Adour Garonne ; Thèse de Maria Cellamare (2009). SAGE bassin versant des étangs littoraux Born et Buch (Préliminaire) (2008). Carte positionnant le point le plus profond : Julien Chabanne

Annexe 3 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac d'Hourtin-Carcans

Localisation	
Origine	Lac naturel
Hydroécorégion	Landes (21)
Département	Gironde (33)
Communes riveraines	Carcans au Sud, Hourtin au Nord
Latitude	N 45°11'14"
Longitude	O 001°03'23"
Coordonnées du point le plus profond	N 45°08'50,0'', O 001°08'02,2''
Morphologie	
Forme de la cuvette du plan d'eau	Peu profond : Lacs peu profonds, zone littorale largement prépondérante, stratification thermique peu étendue et/ou instable (lacs polymictiques)
Type de plan d'eau	N10 - Lac peu profond du bord de l'Atlantique
Type de mélange	Polymictique*
Altitude	18
Superficie (km²)	62
Superficie du bassin versant (km²)	360
Profondeur maximale	11
Profondeur moyenne	3.4
Volume (million de m^3)	210
Volume annuel entrant (million de m^3)	117
Taux de renouvellement annuel	0.56
Distance de l'océan (centre du lac en km)	5.74
Type de substrat	Sableux
Principaux affluents	Craste d'Houdine, Craste de la Matouse, Berle de Lupian, Craste de Carlisse, Berle de la Garroueyre, Craste de Pipeyrous, Craste de Queytive, Negre de l'étang, Craste de Lambrusse
Usages	
Usages du plan d'eau	Nautisme (kitesurf, voile), motonautisme, baignade, chasse à la tonne, pêche
Etat du plan d'eau	
Etat trophique (selon l' O.C.D.E.)	Méso-Eutrophe
Etat écologique*	Bon
Etat biologique*	Médiocre
Etat physico-chimique*	Mauvais
Etat chimique*	Bon
Remarques	
Plus grand lac naturel de France, Eaux riches en fer et turbides	

* Selon l'Agence de l'Eau Adour-Garonne _ Source : Agence de l'eau Adour Garonne ; Thèse de Maria Cellamare (2009), Sage 2005 sur les lacs médocains. Carte positionnant le point le plus profond : Julien Chabanne

Annexe 4 : fiche récapitulative des caractéristiques générales du lac de Lacanau

Localisation	
Origine	Lac naturel
Hydroécorégion	Landes (21)
Département	Gironde (33)
Communes riveraines	Lacanau
Latitude	N 44°58'33"
Longitude	O 001°07'31"
Coordonnées du point le plus profond	N 44°58'37,7'', O 001°07'33,6''
Morphologie	
Forme de la cuvette du plan d'eau	Peu profond : Lacs peu profonds, zone littorale largement prépondérante, stratification thermique peu étendue et/ou instable (lacs polymictiques)
Type de plan d'eau	N10 - Lac peu profond du bord de l'Atlantique
Type de mélange	Polymictique*
Altitude (m)	20
Superficie (km²)	20
Superficie du bassin versant (km²)	285
Profondeur maximale	8
Profondeur moyenne	2.6
Volume (million de m³)	53
Volume annuel entrant (million de m³)	124
Taux de renouvellement annuel	2.34
Distance de l'océan (centre du lac en km)	7.33
Type de substrat	Sableux
Principaux affluents	Canal nord de Talaris-Montaut, Craste du Pont des Tables, Crastes de planquehaute, Canal de la Berle, Canal de Caupos
Usages	
Usages du plan d'eau	Activités nautiques (vole, wakeboard, kitesurf), motonautisme, baignade, chasse à la tonne, pêche
Etat du plan d'eau	
Etat trophique (selon l' O.C.D.E.)	Méso-eutrophe
Etat écologique*	Moyen
Etat biologique*	Moyen
Etat physico-chimique*	Médiocre
Etat chimique*	Bon
Remarques	
Eaux riches en fer et très turbides	

* Selon l'Agence de l'Eau Adour-Garonne

Source : Agence de l'eau Adour Garonne ; Thèse de Maria Cellamare (2009), Sage 2005 sur les lacs médocains. Carte positionnant le point le plus profond : Julien Chabanne

Annexe 5 : tableau des campagnes de mesures et des prélèvements sur les 4 lacs

Lac	Date	Saison	Lac	Date	Saison
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	**06/01/2014**	**Hiver**	**Hourtin-Carcans/Lacanau**	**07/01/2014**	**Hiver**
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	17/02/2014	Hiver	Hourtin-Carcans /Lacanau	18/02/2014	Hiver
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	**10/03/2014**	**Hiver**	**Hourtin-Carcans /Lacanau**	**11/03/2014**	**Hiver**
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	07/04/2014	Printemps	Hourtin-Carcans /Lacanau	08/04/2014	Printemps
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	**12/05/2014**	**Printemps**	**Hourtin-Carcans /Lacanau**	**13/05/2014**	**Printemps**
Parentis-Biscarrosse/Cazaux-Sanguinet	10/06/2014	Printemps	Hourtin-Carcans /Lacanau	11/06/2014	Printemps

Annexe 6 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac de Parentis-Biscarrosse sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moy ± e.t
Secchi (m)	1,70	2,80	2,15 ± 0,41
Zone euphotique (m)	4,25	7,00	5,38 ± 1,03
Température de l'eau (°C)	8,80	21,70	13,72 ± 5,17
pH	7,26	8,42	7,51 ± 0,46
O_2 (mg/l)	9,02	12,89	10,99 ± 1,49
O_2 (%)	98,50	113,20	105,72 ± 6,68
Conductivité (µS.cm^{-1})	157,5	168,8	162,4 ± 4,9
Matières en suspension (MES)	2	5	3 ± 1
Fraction organique MES (%)	41	45	43 ± 3
Fraction minérale MES (%)	55	59	57 ± 3
Nitrate (en N) (mg/l)	0,11	0,67	0,37 ± 0,23
Nitrite (en N) (mg/l)	0,02	0,11	0,06 ± 0,06
Azote ammoniacal (en N) (mg/l)	0,00	0,02	0,01 ± 0,01
Azote minéral soluble (en N) (mg/l)	0,11	0,78	0,40 ± 0,26
Azote Kjeldalhl (en N)	0,6	0,7	0,6 ± 0,1
Azote organique (en N) (mg/l)	0,6	0,7	0,6 ± 0,1
Azote total (mg/l)	0,7	1,4	1,0 ± 0,3
Orthophosphate (en P)	0,005	0,005	0,005 ± 0,000
Phosphore total eau brute (en P) (mg/l)	0.026	0.566	0,214 ± 0,211
N/P	2	43	14 ± 15
Silice (mg/l)	0.06	1.79	0,71 ± 0.65
Total Chl *a* (µg/l)	3.6	12.1	8,2 ± 3,1

Annexe 7 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac Cazaux-Sanguinet sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moy ± e.t
Secchi (m)	3,50	4,80	4,13 ± 0,55
Zone euphotique (m)	8,75	12,00	10,33 ± 1,38
Température de l'eau (°C)	9,30	20,60	13,57 ± 4,53
pH	7,23	8,02	7,50 ± 0,28
O_2 (mg/l)	9,50	12,14	10,82 ± 1,13
O_2 (%)	99,80	109,20	104,22 ± 4,02

Conductivité (µS.cm^{-1})	187,2	204,0	192,0 ± 6,19
Matières en suspension (MES)	1	2	1 ± 1
Fraction organique MES (%)	0	0	0 ± 0
Fraction minérale MES (%)	100	100	100 ± 0
Nitrate (en N) (mg/l)	0.06	1.50	0,33 ± 0,57
Nitrite (en N) (mg/l)	0.14	0.14	0,14 ± 0
Azote ammoniacal (en N) (mg/l)	0.00	0.02	0,01 ± 0,01
Azote minéral soluble (en N) (mg/l)	0.06	1.64	0,36 ± 0,63
Azote Kjeldalhl (en N)	0.6	0.7	0,6 ± 0,1
Azote organique (en N) (mg/l)	0.6	0.7	0,6 ± 0,1
Azote total (mg/l)	0.6	2.3	1,0 ± 0,6
Orthophosphate (en P)	0.008	0.037	0,020 ± 0,015
Phosphore total eau brute (en P) (mg/l)	0.022	0.244	0,102 ± 0,085
N/P	4	39	15 ± 13
Silice (mg/l)	0,80	1,74	1,47 ± 0,35
Total Chl *a* (µg/l)	0,3	3,9	1,9 ± 1,3

Annexe 8 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac d'Hourtin-Carcans sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moy ± e.t
Secchi (m)	2,00	3,50	2,78 ± 0,56
Zone euphotique (m)	5,00	8,75	6,95 ± 1,41
Température de l'eau (°C)	9,10	22,40	12,14 ± 3,30
pH	7,40	8,03	7,55 ± 0,15
O_2 (mg/l)	9,43	12,13	11,08 ± 0,88
O_2 (%)	98,60	109,50	103,04 ± 5
Conductivité (µS.cm^{-1})	279,0	321,0	291,60 ± 17,13
Matières en suspension (MES)	3	1692	341 ± 755
Fraction organique MES (%)	0	0	0 ± 0
Fraction minérale MES (%)	100	100	100 ± 0
Nitrate (en N) (mg/l)	0,18	4,37	1,08 ± 1,62
Nitrite (en N) (mg/l)	0,00	0,17	0,06 ± 0,10
Azote ammoniacal (en N) (mg/l)	0,04	0,18	0,13 ± 0,06
Azote minéral soluble (en N) (mg/l)	0,25	4,54	1,22 ± 1,65
Azote Kjeldalhl (en N)	0,6	1,4	1,0 ± 0,3
Azote organique (en N) (mg/l)	0,5	1,3	0,9 ± 0,3
Azote total (mg/l)	1,3	5,5	2,1 ± 1,6
Orthophosphate (en P)	0,000	0,000	0,00 ± 0,00
Phosphore total eau brute (en P) (mg/l)	0,064	0,407	0,186 ± 0,143
N/P	4	25	15 ± 8
Silice (mg/l)	0,50	2,22	1,52 ± 0,76
Total Chl *a* (µg/l)	0,6	7,1	2,7 ± 2,5

Annexe 9 : tableau résumé de l'ensemble des résultats (physico-chimiques et biologiques) mesurés sur le lac de Lacanau sur les échantillons intégrés de la zone euphotique (moyenne, minimum, maximum, écart-type)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moy ± e.t
Secchi (m)	1,70	2,70	2,12 ± 0,41
Zone euphotique (m)	4,25	6,75	5,29 ± 1,03
Température de l'eau (°C)	9,40	22,70	14,37 ± 5,22
pH	7,17	7,69	7,40 ± 0,23
O_2 (mg/l)	8,69	12,05	10,45 ± 1,23
O_2 (%)	97,00	108,50	101,33 ± 4,88

Conductivité (µS.cm^{-1})	216,0	248,0	231,50 ± 11,38
Matières en suspension (MES)	2	3	2 ± 1
Fraction organique MES (%)	5	20	12 ± 11
Fraction minérale MES (%)	80	95	88 ± 11
Nitrate (en N) (mg/l)	0,10	2,00	0,52 ± 0,74
Nitrite (en N) (mg/l)	0,12	0,12	0,12 ± 0
Azote ammoniacal (en N) (mg/l)	0,02	0,11	0,06 ± 0,03
Azote minéral soluble (en N) (mg/l)	0,12	2,12	0,59 ± 0,77
Azote Kjeldalhl (en N)	0,6	1,1	0,8 ± 0,2
Azote organique (en N) (mg/l)	0,5	1,1	0,8 ± 0,2
Azote total (mg/l)	0,9	2,9	1,4 ± 0,8
Orthophosphate (en P)	0,000	0,000	0 ± 0
Phosphore total eau brute (en P) (mg/l)	0,009	0,304	0,124 ± 0,114
N/P	5	145	36 ± 54
Silice (mg/l)	1,51	4,55	3,19 ± 1,19
Total Chl *a* (µg/l)	3,2	10,5	5,1 ± 2,9

Annexe 10 : tableau résumé de l'ensemble des données météorologiques quotidiennes ou sur 7 jours récupérées sur le site internet de Météo France pour le lac de Parentis-Biscarrosse et de Cazaux-Sanguinet

40046001 BISCARROSSE	06/01/2014	10/02/2014	10/03/2014	07/04/2014	12/05/2014	10/06/2014
Moy T°C	13,6	9,7	11,6	15,7	14,2	18
Max T°C	16,8	10,7	19,1	20	17,1	22
Vent moy (m/s)	4,2	13,5	3,2	4	5,3	5
Vent max (m/s)	17	29,2	7,3	11,6	10,3	12
Précipitation moy (mm)	0,2	7,8	0	0,4	0,8	0
Ensoleillement moy (Joules/cm²)	402	450	1781	1802	1626	2334
Précipitation moyenne sur 7 jours (mm)	4,2	5,2	2,2	1,7	0,6	1,3
T°C moyenne sur 7 jours	12,1	10,1	11,2	14,725	15,375	19,6
Vent moyen sur 7 jours (m/s)	6,3	9,7	4,8	3,8	4,6	4,1
Ensoleillement moyen sur 7 jours (Joules/cm²)	281	674	1313	1472	1953	2620

Annexe 11 : tableau résumé de l'ensemble des données météorologiques quotidiennes ou sur 7 jours récupérées sur le site internet de Météo France pour le lac d'Hourtin-Carcans et de Lacanau

33236002 LEGE-CAP-FERRET et 33281001 BORDEAUX-MERIGNAC	07/01/2014	11/02/2014	11/03/2014	08/04/2014	13/05/2014	11/06/2014
Moy T°C	13	9,5	11	13,4	14,4	21
Max T°C	15,6	11,7	15,4	17,1	18,6	26
Vent moy (m/s)	4,2	10,6	3,2	4	5,8	4
Vent max (m/s)	10,2	24,9	7,5	8,1	14,7	13
Précipitation moy (mm)	0	4,8	0	0	0,2	0
Ensoleillement moy (Joules/cm²)	597	231	1673	2164	2472	1895
Précipitation moyenne sur 7 jours (mm)	1,6	4,4	2,4	2	0,2	1
T°C moyenne sur 7 jours	12,3	10,3	11,3	14,5	15,6	20,4
Vent moyen sur 7 jours (m/s)	7,1	11,1	4	4,2	5,2	4,5
Ensoleillement moyen sur 7 jours (Joules/cm²)	345	598	1598	1366	1782	2526

Annexe 12 : tableau des traits morpho-fonctionnels présents dans le tableau de référence listés en colonne

Taille de l'individu minimale	Présence de cellule spécialisée	Biovolume cellulaire théorique en micromètre	Stratégie r K
Taille de l'individu maximale	Type de cellule spécialisée	Biovolume théorique de l'individu en micromètre	Prédateurs potentiels
Forme de vie (cellule, filament*, colonie*)	Présence de chloroplaste	Largeur de la cellule minimale	Type d'eau où l'organisme est retrouvé (eau douce, eau salée etc.)
Autre forme de vie (cellule, filament, colonie)	Nombre de chloroplaste	Largeur de la cellule maximale	Répartition (cosmopolite etc.)
Forme de la cellule simple (arrondie, droite, symétrique etc.)	Présence d'une gaine	Longueur de la cellule minimale	Période de l'année le plus souvent retrouvé
Autre forme de la cellule simple (arrondie, droite, symétrique etc.)	Présence de tractus	Longueur de la cellule maximale	Préférence dans le mélange des eaux
Forme de la cellule définie par Phytobs (cylinder, paralellepiped, etc.)	Type de tractus (fin, épais)	Diamètre minimal	Type de lac (petit, profond etc.)
Forme de l'individu simple (droite, enroulée, courbée, etc.)	Présence d'un squelette siliceux	Diamètre maximal	Type de reproduction (sexuée (isogamie*, anisogamie*, cystogamie*, oogamie*), asexuée (fission binaire, division cellulaire, fragmentation)
Forme de l'individu définie par Phytobs	Présence d'un lorica*	Taux de croissance	Indicateur de la qualité de l'eau
Possibilité de motilité*	Présence d'ornementation	Vitesse de sédimentation	Trophie de l'eau (eutrophe, oligotrophe etc.) où l'organisme est le plus souvent retrouvé
Type de motilité (verticale, etc.)	Présence de protubérance	Présence de chlorophylle a	Couleur de l'eau
Présence de flagelle	Type de protubérance	Présence de chlorophylle b	Type de résistance de l'espèce (manque de lumière etc.)
Nombre de flagelle	Taille de(s) protubérance(s)	Présence de chlorophylle c	Sensibilité aux variations d'O2
Présence d'aérotopes (vacuole de gaz)	Nombre de(s) protubérance(s)	Présence de xanthophylles	pH optimal
Nombre d'aérotopes	Type de protubérance_2	Présence de phycobilines	Sensibilité aux variations du pH
Présence de vacuole contractile*	Taille de(s) protubérance(s)_2	Production de toxines	Sensibilité à des variations du milieu
Nombre de vacuole contractile	Nombre de(s) protubérance(s)_2	Possibilité de fixer l'azote	Appartenance à un groupe fonctionnel défini par Reynolds
Présence de mucilage	Epaisseur de la paroi cellulaire	Trophie de l'espèce	Coefficient de sténoecie de l'espèce
	Apparence de la paroi cellulaire (lisse, rugueuse)	Stratégie CSR	Cote spécifique de l'espèce

Annexe 13 : liste des espèces du phytoplancton identifiées dans les quatre lacs aquitains pendant toute la période d'étude (2014)

	Embranchement	Taxa	Code taxon	Hourtin	Lacanau	Cazaux	Parentis
Bacillariophycées ou Diatomées	**Bacillariophyta**	*Diatomées pennées indéterminées*	INDPEN	x	x		
		Bacillariophyceae					
		Achnanthidium minutissimum (Kützing) Czarnecki	ACDMIN		x		x
		Amphora Ehrenberg ex Kützing	AMPSPX	x			
		Cymbella C.A. C. Agardh	CYMSPX	x	x		
		Encyonema Kützing	ENCSPX	x			

		Encyonema neogracile Krammer	ENCNEO		x		
		Gomphonema Ehrenberg	GOMSPX	x			
		Gomphonema acuminatum Ehrenberg	GOMACU		x		
		Navicula radiosa Kützing	NAVRAD	x	x	x	
		Nitzschia Hassall	NIZSPX	x	x	x	x
		Nitzschia fruticosa Hustedt	NIZFRU				x
		Nitzschia intermedia Hantzsch ex Cleve & Grunow	NIZINM	x			
		Pinnularia Ehrenberg	PINSPX			x	
		Surirella robusta Ehrenberg	SURROT		x		
		Coscinodiscophyceae					
		Actinocyclus normanii (Greg. ex Greville) Hustedt	ACONOR	x	x	x	x
		Aulacoseira ambigua (Grunow) Simonsen	AULAMB		x	x	x
		Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen	AULGRA		x		x
		*Aulacoseira granulata var, angustissima (*Ehrenberg) Simonsen (O.M.) Simonsen	AULANG		x	x	x
		Aulacoseira italica (Ehrenberg) Simonsen	AULITA			x	
		Aulacoseira subarctica (O.Muller) Haworth	AULSUB		x	x	x
		Cyclostephanos invisitatus (Hohn & Hellerman) Theriot Stoermer & Hakans	CYSINV		x	x	x
		Cyclotella (Kützing) Brébisson	CYCSPX		x	x	
		Cyclotella comensis Grunow	CYCCOM	x	x	x	
		Cyclotella cyclopuncta Hakansson & Carter	CYCCYC			x	
		Cyclotella ocellata Pantocsek	CYCOCE			x	
		Diatomées centriques indéterminées	INDCEN		x		
		Diatomées centriques indéterminées <10 µm	INDCE5	x	x	x	x
		Discostella pseudostelligera (Hustedt) Houk & Klee	DISPSE			x	x
		Puncticulata radiosa (Lemmermann) Håkansson	PUNRAD	x	x	x	x
		Stephanodiscus Ehrenberg	STESPX		x		
		Urosolenia eriensis F. E. Round & R.M. Crawford	URSERI		x	x	
		Urosolenia longiseta (Zacharias) Bukhtiyarova	URSLON		x	x	x
		Fragilariophyceae					
		Asterionella formosa Hassall	ASTFOR			x	x
		Diatoma Bory de St Vincent	DIASPX				x
		Fragilaria Lyngbye	FRASPX		x	x	
		Fragilaria crotonensis Kitton	FRACRO			x	x
		Fragilaria gracilis Oestrup	FRAGRA				x
		Fragilaria nanana Lange-Bertalot	FRANAN		x		
		Tabellaria flocculosa (Roth) Kützing	TABFLO	x	x	x	x
		Ulnaria delicatissima var. angustissima (W.Smith) Aboal & Silva	ULNDAN		x	x	x
Chlorophycées	**Charophyta**	**Conjugatophyceae**					
		Mougeotia C. Agardh	MOUSPX	x	x	x	x
		Mougeotia gracillima (Hassall) Wittrock	MOUGRA	x			
		Klebsormidiophyceae					
		Elakatothrix gelatinosa Wille	ELAGEL	x	x	x	x
Desmidiées		**Zygnematophyceae**					
		Closterium Nitzsch Ex Ralfs	CLOSPX	x	x	x	
		Closterium aciculare T. West	CLOACI	x			x
		Closterium acutum var, variabile (Lemmermann) Krieger	CLOACV		x		x

		Closterium gracile De Brébisson	CLOGRA		x		
		Closterium incurvum Brébisson	CLOINC	x		x	
		Closterium parvulum Nägeli	CLOPAR	x			
		Closterium pronum Breb.	CLOPRO		x		x
		Cosmarium Corda	COSSPX		x		
		Cosmarium botrytis Meneghini ex Ralfs	COSBOT	x			
		Cosmarium majae Strom	COSMAJ	x		x	
		Cosmarium ornatum Ralfs	COSORN	x			
		Cosmarium punctulatum Brébisson	COSPUN	x	x		
		Cosmarium regnellii Wille	COSREG	x			
		Cosmarium tetraophtalmum Brébisson ex Ralfs	COSTET			x	
		Euastrum lacustre (Messikommer) Coesel	EUALAC	x			
		Euastrum pectinatum Brébisson	EUAPEC	x			
		Hyalotheca dissiliens (SM.) Brébisson	HYTDIS	x	x	x	
		Spondylosium planum (Wolle) West & West	SPOPLA	x			x
		Staurastrum Meyen	STASPX	x	x	x	x
		Staurastrum anatinum Cooke & Wills	STAANA			x	x
		Staurastrum planctonicum Teiling	STAPLA				x
		Staurastrum smithii (G.M. Smith) Teil.	STASMI		x		
		Staurastrum tetracerum (Kützing) Ralfs	STATET	x	x		
		Staurodesmus Teil.	STDSPX		x		
		Staurodesmus corniculatus (Lund.) Teil.	STDCOR			x	x
		Staurodesmus cuspidatus (Brébisson) Teil.	STDCUS		x	x	x
		Teilingia excavata (Ralfs) Bourrelly	TEIEXC			x	
		Teilingia granulata (Roy & Biss.) Bourr.	TEIGRA	x	x		
		Xanthidium antilopaeum (Breb.) Kützing	XANANT			x	
Chlorophycées	**Chlorophyta**	*Chlorophycées filamenteuses indéterminées*	INDCFI	x			
		Chlorophyceae					
		Ankistrodesmus bernardii J. Komárek	ANKBER				x
		Ankistrodesmus fusiformis Corda	ANKFUS	x	x		
		Ankistrodesmus spiralis (Turn.) Lemmermann	ANKSPI	x	x	x	
		Ankyra lanceolata (Korshikov) Fott	ANYLAN				x
		Botryococcus braunii Kützing	BOTBRA	x	x	x	x
		Chlamydomonas Ehrenberg	CHLSPX	x	x	x	x
		Chlorococcales indéterminées	INDCHO	x	x		
		Chlorolobion glareosum (Hindák) J. Komárek	CHOGLA	x	x	x	x
		Chlorolobion lunulatum Hindák	CHOLUN		x	x	x
		Coelastrum microporum Nägeli	COEMIC		x		
		Coelastrum pulchrum Schmidle	COEPUL		x		x
		Coenochloris fottii (Hindák) Tsarenko	COOFOT	x	x	x	x
		Crucigenia tetrapedia (Kirchn.) W.G.S. West	CRUTET	x	x		
		Crucigenia truncata Smith	CRUTRU			x	x
		Crucigeniella Lemmermann	CRCSPX		x		
		Crucigeniella rectangularis (Naegeli) Komárek	CRCREC	x		x	
		Crucigeniella truncata (Smith) Komárek	CRCTRU			x	
		Desmodesmus armatus (Chodat) Hegewald	DEDARM		x		x
		Desmodesmus communis (Hegewald) Hegewald	DEDCOM	x	x		x
		Desmodesmus hystrix (Lagerheim) Hegewald	DEDHYS		x		
		Desmodesmus intermedius (Chodat) Hegewald	DEDINT	x			

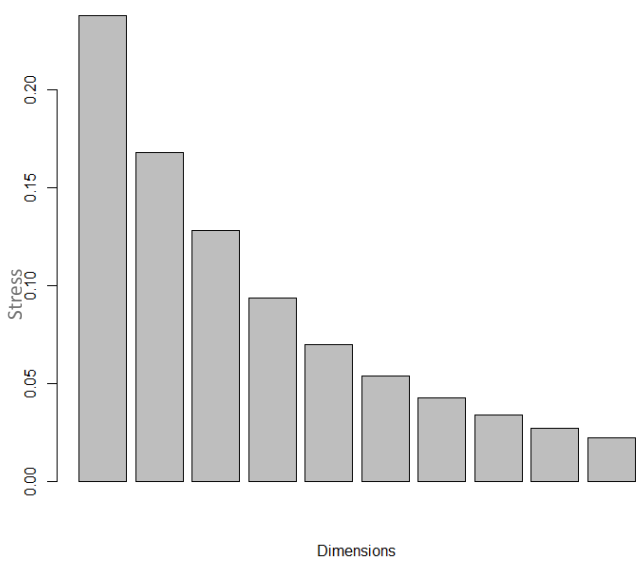
Desmodesmus lefevrei (Deflandre) An, Friedl & Hegewald	DEDLEF				x
Desmodesmus opoliensis (P.G. Richter) E.H. Hegewald	DEDOPO				x
Desmodesmus serratus (Corda) An, Friedl & Hegewald	DEDSER	x	x	x	x
Desmodesmus spinosus (Chodat) Hegewald	DEDSPI			x	x
Franceia javanica (Bernard) Hortobágyi	FRNAMP			x	
Gloeocystis vesiculosa Nägeli	GLOVES		x		
*Granulocystis helenae*Hindák	GCYHEL	x			
Hariotina reticulata Dangeard	HARRET		x		x
Korshikoviella limnetica (Lemmermann) Silva	KORLIM	x			
Monoraphidium arcuatum (Korshikov) Hindák	MONARC				x
Monoraphidium circinale (Nyg.) Nygaard	MONCIR	x	x		
Monoraphidium contortum (Thur.) J. Komárek-Legn.	MONCON		x		x
Monoraphidium griffithii (Berk.) Legn.	MONGRI	x	x	x	
Monoraphidium minutum (Naegeli) Komárek-legn.	MONMIN	x	x	x	x
Monoraphidium nanum (Ettl) Hindák	MONNAN	x	x	x	x
Monoraphidium tortile (W.et G.S.West) Komárek-Legn.	MONTOR		x	x	x
Oedogonium Link	OEDSPX			x	
Pandorina morum Bory	PADMOR	x			
Pediastrum angulosum (Ehrenberg) ex.Menegh.	PEDANG	x		x	x
Pediastrum boryanum (Turpin) Menegh.	PEDBOR	x			x
Pediastrum duplex Meyen	PEDDUP		x	x	x
Pediastrum duplex var, gracillimum W.et G.S.West	PEDGRA				x
Pediastrum simplex Meyen	PEDSIM				x
Pediastrum tetras (Ehrenberg) Ralfs	PEDTET		x	x	x
Planktosphaeria gelatinosa G.M. Smith	PLKGEL	x	x	x	x
Pyramidomonas Stein	PYASPX		x		
Scenedesmus Meyen	SCESPX	x	x		x
Scenedesmus aculeato-granulatus Hortobagyi	SCEAGR		x		
Scenedesmus acuminatus (Lagerheim) Chodat	SCEACM	x	x	x	
Scenedesmus armatus var, boglariensis Hortobagyi	SCEABO				x
Scenedesmus circumfusus Hortobagyi	SCECIR	x			
Scenedesmus disciformis (Chodat) Fott & Komárek	SCEDIC		x		
Scenedesmus ecornis (Ehrenberg) Chodat	SCEECO			x	
Scenedesmus granulatus f. spinosus Hortobagyi	SCEGRS	x			
Scenedesmus lefevrei var. manguinii Lefév. & Bourrelly	SCELEM		x		
Scenedesmus longispina Chodat	SCELON				x
*Scenedesmus obtusus*Meyen	SCEOBT	x			
Scenedesmus quadrispina Chodat	SCEQUS	x			
Sphaerocystis schroeteri Chodat	SPESCH				x
Tetraedron caudatum (Corda) Ralfs	TEACAU	x	x	x	
Tetraedron incus (Teil.) G.M. Smith	TEAINC	x	x		
Tetraedron minimum (Braun) Hansgirg	TEAMIN		x	x	
Tetrastrum triangulare (Chodat) Komárek	TERTRI	x	x	x	x
Trochiscia Kützing	TROSPX		x	x	
Trochiscia planctonica	TROPLA	x	x		

		Volvocales indéterminées	INDVOL	x	x		
		Prasinophyceae					
		Nephroselmis F. Stein	NESSPX	x			
		Trebouxiophyceae					
		Chlorella Beijerinck	CLLSPX	x	x	x	x
		Dictyosphaerium pulchellum Wood	DICPUL				x
		Dictyosphaerium subsolitarium Van Goor	DICSUB			x	
		Lagerheimia R. Chodat	LAGSPX	x			
		Oocystis lacustris Chodat	OOCLAC	x	x	x	x
		Oocystis marssonii Lemmermann	OOCMAR	x		x	x
		Siderocelis ornata (Fott) Fott	SIDORN	x	x		
		Siderocystopsis fusca (Korshikov) Swale	SICFUS		x		
Chryptophycées	**Cryptophyta**	**Cryptophyceae**					
		Chroomonas acuta Utermohl	CHMACU		x		
		Chroomonas coerulea (Geitler) Skuja	CHMCOE		x		
		Cryptomonas curvata Ehrenberg emend Penard	CRYCUR		x	x	
		Cryptomonas erosa Ehrenberg	CRYERO	x	x	x	x
		Cryptomonas marssonii Skuja	CRYMAR	x	x	x	x
		Cryptomonas ovata Ehrenberg	CRYOVA		x	x	x
		Cryptomonas platyuris Skuja	CRYPLA		x		
		Plagioselmis nannoplanctica (H. Skuja) G. Novarino, I.A.N. Lucas & S. Morrall	PLGNAN	x	x	x	x
Cyanobactéries	**Cyanobacteria**	*Cyanobactéries filamenteuses indéterminées*	INDCYF	x	x		
		Cyanophyceae					
		Anabaena Bory de St Vincent	ANASPX				x
		Aphanizomenon gracile Lemmermann	APHGRA				x
		Aphanocapsa delicatissima W. & G.S. West	APADEL		x	x	x
		Aphanocapsa elachista W. & G.S. West	APAELA		x	x	x
		Aphanocapsa holsatica (Lemmermann) Cronberg & J. Komárek	APAHOL	x	x	x	x
		Aphanocapsa incerta (Lemmermann) Cronberg & J. Komárek	APAINC				x
		Aphanocapsa planctonica (Smith) Komárek & Anagnostidis	APAPLA	x	x		
		Aphanothece Nägeli	APOSPX				x
		Aphanothece clathrata W. & G.S. West	APOCLA	x	x	x	x
		Aphanothece elabens (Brébisson) Elenkin	APOELA	x			
		Aphanothece minutissima (West) Komárková-Legnerová & Cronberg	APOMIN	x	x	x	x
		Aphanothece smithii J. Komárková-Legnerová & G. Cronberg	APOSMI	x	x		x
		Aphanothece stagnina (Sprengel) Braun in Rabenhorst	APOSTA	x	x		
		Chroococcus Nägeli	CHRSPX	x	x		x
		Chroococcus limneticus Lemmermann	CHRLIM			x	
		Chroococcus minor (Kützing) Nägeli	CHRMIR	x			
		Chroococcus obliteratus Richter	CHROBL	x	x	x	
		Chroococcus turgidus Nägeli	CHRTUR		x		
		Coelomoron pusillum (Van Goor) J. Komárek	CELPUS		x		
		Cyanobacterium notatum(Skuja) Komárek, Kopeck & Cepák	CBANOT				x
		Cyanocatena planctonica Hindák	CYEPLA			x	
		Cyanodictyon planctonicum B. Meyer	CDIPLA	x	x		x

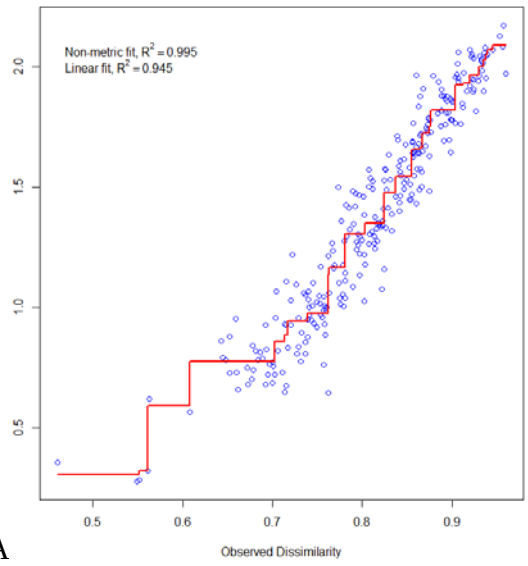
		Cyanogranis ferruginea (Wawrik) Hindák	CYGFER		x	x	x
		Dolichospermum flos-aquae (Brébisson ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek	DOLFLO				x
		Dolichospermum spiroides (Klebahn) Wacklin, Hoffmann & Komárek	DOLSPI				x
		Glaucospira Lagerheim	GLUSPX				x
		Komvophoron skujae Anagnostidis & J. Komárek	KOMSKU	x			
		Limnothrix redekei (Van Goor) Meffert	LIMRED	x			
		Microcystis aeruginosa Kützing	MIOAER		x		x
		Microcystis firma (Kützing) Schmidle	MIOFIR		x		
		Microcystis ichthyoblabe Kützing	MIOICH		x		
		Pannus Hickel	PANSPX	x	x		
		Phormidium Kützing ex Gomont	PHOSPX	x			
		Planktolyngbya Anagnostidis & J. Komárek	PLLSPX			x	
		Planktolyngbya contorta (Lemmermann) Anagnostidis & J. Komárek	PLLCON	x	x		
		Planktolyngbya limnetica (Lemmermann) Komarkova-Legnerova	PLLLIM	x	x		
		Planktothrix agardhii (Gomont) Anagnostidis & J. Komárek	PLAAGA				x
		Pseudanabaena Lauterborn	PSESPX	x	x		x
		Pseudanabaena biceps Böcher	PSEBIC	x			
		Pseudanabaena limnetica (Lemmermann) J. Komárek	PSELIM	x	x	x	x
		Pseudanabaena woronichinii Anagnostidis	PSEWOR				x
		Radiocystis aphanothecoidea Hindák	RAIAPH	x			
		Radiocystis geminata Skuja	RAIGEM	x	x	x	
		Rhabdoderma lineare Schmidle & Lauterborn em. Hollerbach	RHALIN	x	x	x	
		Rhabdogloea minuta Hickel	RGLMIN	x			
		Rhabdogloea smithii (R. & F. Chodat) Komárek	RGLSMI	x		x	
		Romeria elegans Woloszynska	ROMELE				x
		Snowella lacustris (Chodat) Komárek & Hindák	SNOLAC			x	x
		Synechococcus nidulans (Pringsheim) Komárek	SYCNID			x	x
		Synechocystis aquatilis Sauvageau	SYYAQU			x	x
		Woronichinia naegeliana (Unger) Elenkin	WORNAE				x
Dinophycées	**Dinophyta**	**Dinophyceae**					
		Ceratium hirundinella (O.F.M.) Bergh.	CERHIR	x	x	x	x
		Dinophycées indéterminées	INDDIN	x			x
		Gymnodinium F. Stein	GYMSPX		x		
		Gymnodinium cnecoides T. M. Harris	GYMCNE	x	x	x	
		Katodinium Fott	KATSPX			x	
		Peridiniopsis cunningtonii Lemmermann	PEPCUN		x		
		Peridinium Ehrenberg	PERSPX	x	x		x
		Peridinium cinctum (O.F.Muller) Ehrenberg	PERCIN	x	x		
		Peridinium lomnickii Woloszynska	PERLOM		x		
		Peridinium umbonatum Stein	PERUMB	x	x	x	x
		Peridinium willei Huifelt-Kaas	PERWIL	x	x	x	x
Euglenophycées	**Euglenophyta**	**Euglenophyceae**					
		Trachelomonas granulosa Playf.	TRAGRA				x
		Trachelomonas hispida (Perty) Stein	TRAHIS		x		
		Trachelomonas rugulosa Stein	TRARUG				x
		Trachelomonas volvocina Ehrenberg	TRAVOL				x

Chysophycées	Haptophyta	**Cocolithophyceae**					
		Chrysochromulina parva Lackey	CCHPAR	x	x	x	x
	Heterokontophyta	*Chrysophycées indéterminées*	INDCHR	x	x	x	x
		Chrysophyceae					
		Bitrichia chodatii (Reverdin) Chodat	BITCHO	x			
		Chromulina Cienkowski	CHUSPX	x	x	x	x
		Chrysamoeba Klebs	CRMSPX	x	x		
		Chrysamoeba mikrokonta Skuja	CRMMIK			x	
		Chrysolykos planctonicus B. Marck	CYYPLA			x	
		Chrysolykos skujae (Nauwerck) Bourrelly	CYYSKU	x	x		
		Dinobryon acuminatum Ruttner	DINACU		x	x	
		Dinobryon bavaricum Imohf	DINBAV	x	x	x	
		Dinobryon cylindricum Imohf	DINCYL		x	x	x
		Dinobryon divergens Imohf	DINDIV	x	x	x	
		Dinobryon sociale var. americanum (Brunnthaler) Bachm.	DINAME			x	
		Dinobryon suecicum var, longispinum Lemmermann	DINSLO		x	x	
		Kephyrion Pascher	KEPSPX			x	x
		Kephyrion annulatum De Graaf	KEPANN			x	
		Kephyrion colliferum De Graaf	KEPCOL			x	
		*Kephyrion littorale*Lund	KEPLIT	x	x	x	
		Kephyrion rubri-claustri Conrad	KEPRUB		x		x
		Kephyrion welshii (Juris) Starmach	KEPWEL		x		
		Ochromonas Wyssotski	OCHSPX	x	x	x	x
		Pseudokephyrion Pascher emend. G. Schmid	PSKSPX				x
		Pseudokephyrion cylindricum (Lack.) Bourrelly	PSKCYL			x	
		Pseudokephyrion entzii (Conrad) Schmid	PSKENT		x		
		Pseudokephyrion klarnetii Bourrelly	PSKKLA	x	x		
		Pseudokephyrion pseudospirale Bourrelly	PSKPSE		x	x	
		Salpingoeca H.J. Clark	SALSPX	x		x	
		Uroglenopsis eustylis (Skuja) Thompson & Wujek	URGEUS		x		
		Eustigmatophyceae					
		Pseudostaurastrum limneticum (Borge) Chodat	PSTLIM				x
		Synurophyceae					
		Mallomonas Perty	MALSPX	x	x	x	x
		Mallomonas acaroides Perty	MALACA	x			
		Mallomonas akrokomos Pascher	MALAKR				x
		Mallomonas globosa Schiller	MALGLO				x
		Mallomonas tonsurata Teiling	MALTON	x			
		Spiniferomonas Takahashi	SPNSPX	x			
		Spiniferomonas bourrellyi Takahashi	SPNBOU			x	
		Syncrypta Ehrenberg	SYTSPX		x		
		Synura Ehrenberg	SYUSPX				x
		Synochromonas elaeochrus Jane	SYRELA		x		
Xanthophycées		**Xanthophyceae**					
		Nephrodiella lunaris Pascher	NEHLUN	x			
		Tetraëdriella jovetti (Bourrelly) Bourrelly	TEEJOV			x	

Annexe 14 : A : barplot représentant les valeurs de stress de la NMDS de la communauté phytoplanctonique. B : graphique de Shepard à 5 dimensions



A



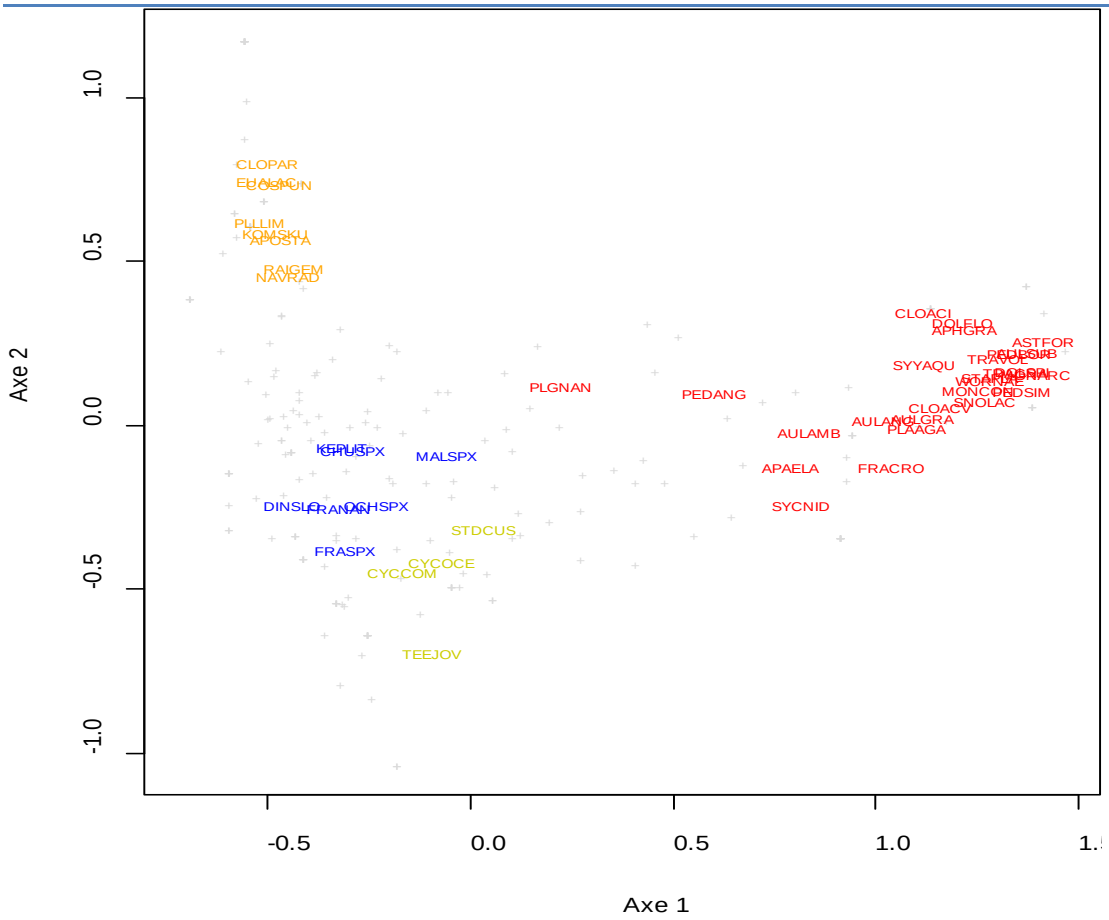
B

Annexe 15 : espèces indicatrices pour chaque lac avec la valeur indicatrice et la probabilité (<0.05)

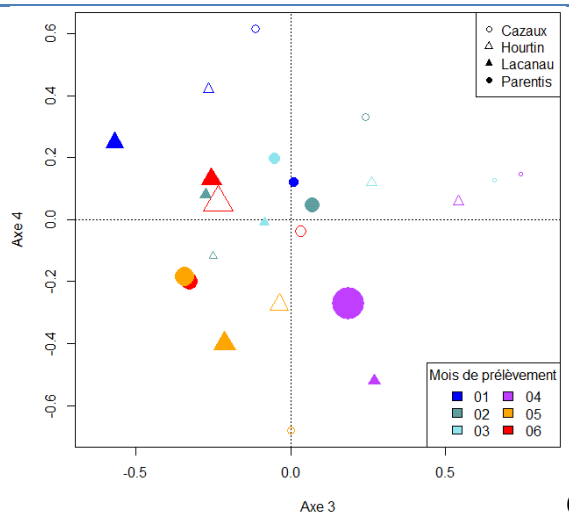
Code taxon	Espèce	Lac	Valeur indicatrice	Probabilité
PLAAGA	*Planktothrix agardhii*	Parentis-Biscarrosse	**1.0000**	0.001
STAPLA	*Staurastrum planctonicum*		**1.0000**	0.001
TRAGRA	*Trachelomonas granulosa*		**1.0000**	0.001
TRAVOL	*Trachelomonas volvocina*		**1.0000**	0.001
WORNAE	*Woronichinia naegeliana*		**1.0000**	0.001
ASTFOR	*Asterionella formosa*		0.9999	0.001
AULSUB	*Aulacoseira subarctica*		0.9986	0.001
MONCON	*Monoraphidium contortum*		0.9930	0.001
CLOACV	*Closterium acutum var. variabile*		0.9922	0.001
AULAMB	*Aulacoseira ambigua*		0.8947	0.001
FRACRO	*Fragilaria crotonensis*		0.8764	0.002
APHGRA	*Aphanizomenon gracile*		0.8333	0.001
DOLSPI	*Dolichospermum spiroides*		0.8333	0.001
AULANG	*Aulacoseira granulata var. angustissima*		0.7927	0.008
DOLFLO	*Dolichospermum flos-aquae*		0.6667	0.004
MONARC	*Monoraphidium arcuatum*		0.6667	0.008
PEDBOR	*Pediastrum boryanum*		0.6592	0.006
SYYAQU	*Synechocystis aquatilis*		0.6582	0.006
PEDANG	*Pediastrum angulosum*		0.6574	0.019
AULGRA	*Aulacoseira granulata*		0.6538	0.006
CLOACI	*Closterium aciculare*		0.6481	0.010
SYCNID	*Synechococcus nidulans*		0.6183	0.019
PLGNAN	*Plagioselmis nannoplanctica*		0.5510	0.008
APAELA	*Aphanocapsa elachista*		0.5078	0.038
PEDSIM	*Pediastrum simplex*		0.5000	0.039
SNOLAC	*Snowella lacustris*		0.4922	0.036
CYCOCE	*Cyclotella ocellata*	Cazaux-Sanguinet	**0.6667**	0.005
STDCUS	*Staurodesmus cuspidatus*		**0.6418**	0.027
CYCCOM	*Cyclotella comensis*		**0.6213**	0.011
TEEJOV	*Tetraëdriella jovetti*		**0.5000**	0.042

PLLLIM	*Planktolyngbya limnetica*	Hourtin	**0.9385**	0.001
RAIGEM	*Radiocystis geminata*		**0.9241**	0.001
NAVRAD	*Navicula radiosa*		**0.8973**	0.001
EUALAC	*Euastrum lacustre*		**0.8333**	0.001
APOSTA	*Aphanothece stagnina*		**0.6110**	0.016
CLOPAR	*Closterium parvulum*		0.5000	0.047
KOMSKU	*Komvophoron skujae*		0.5000	0.041
COSPUN	*Cosmarium punctulatum*		0.4880	0.035
ANKSPI	*Ankistrodesmus spiralis*		0.4682	0.048
DINSLO	*Dinobryon suecicum var. longispinum*	Lacanau	**0.6296**	0.011
OCHSPX	*Ochromonas*		**0.6296**	0.008
FRASPX	*Fragilaria*		**0.5707**	0.013
MALSPX	*Mallomonas*		**0.5319**	0.023
FRANAN	*Fragilaria nanana*		**0.5000**	0.037

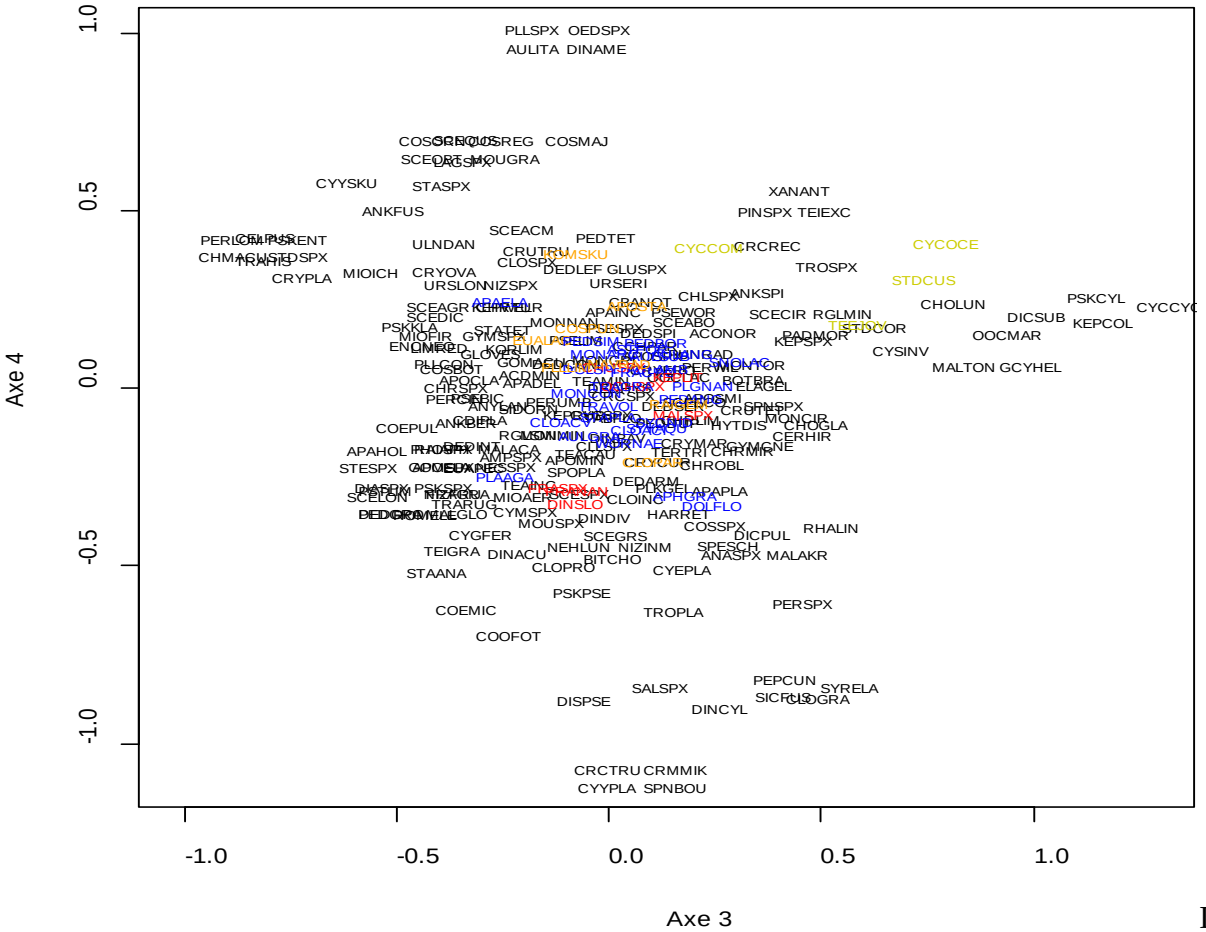
Annexe 16 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 1 et 2 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. Projection des espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu)



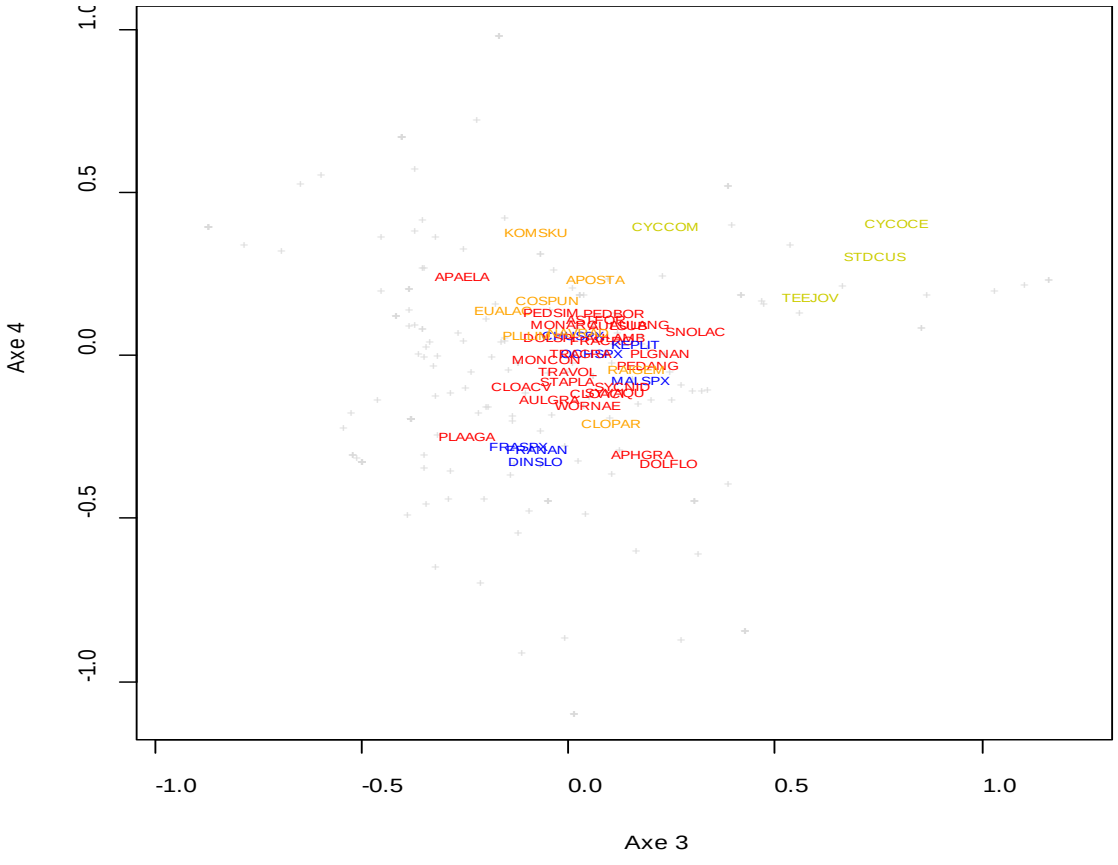
Annexe 17 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 3 et 4 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. C : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons à chaque campagne. D : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices de chaque lac (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu). E : projection des espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés



C

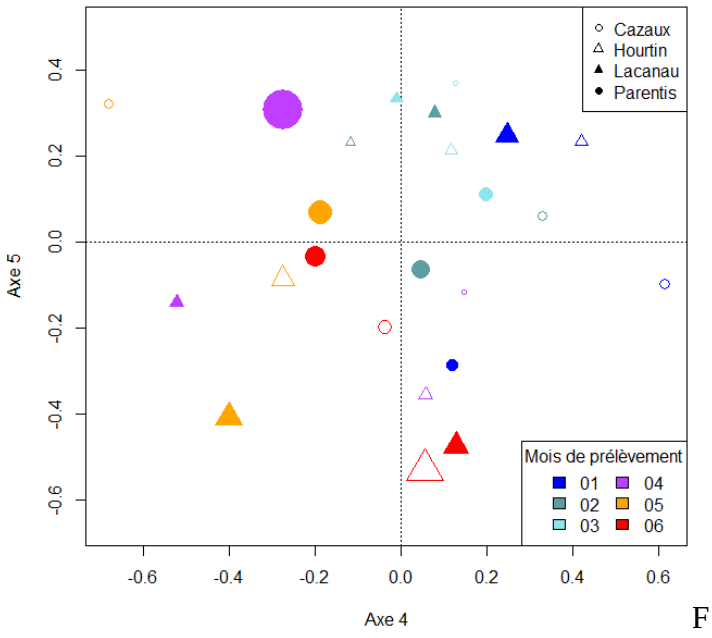


D

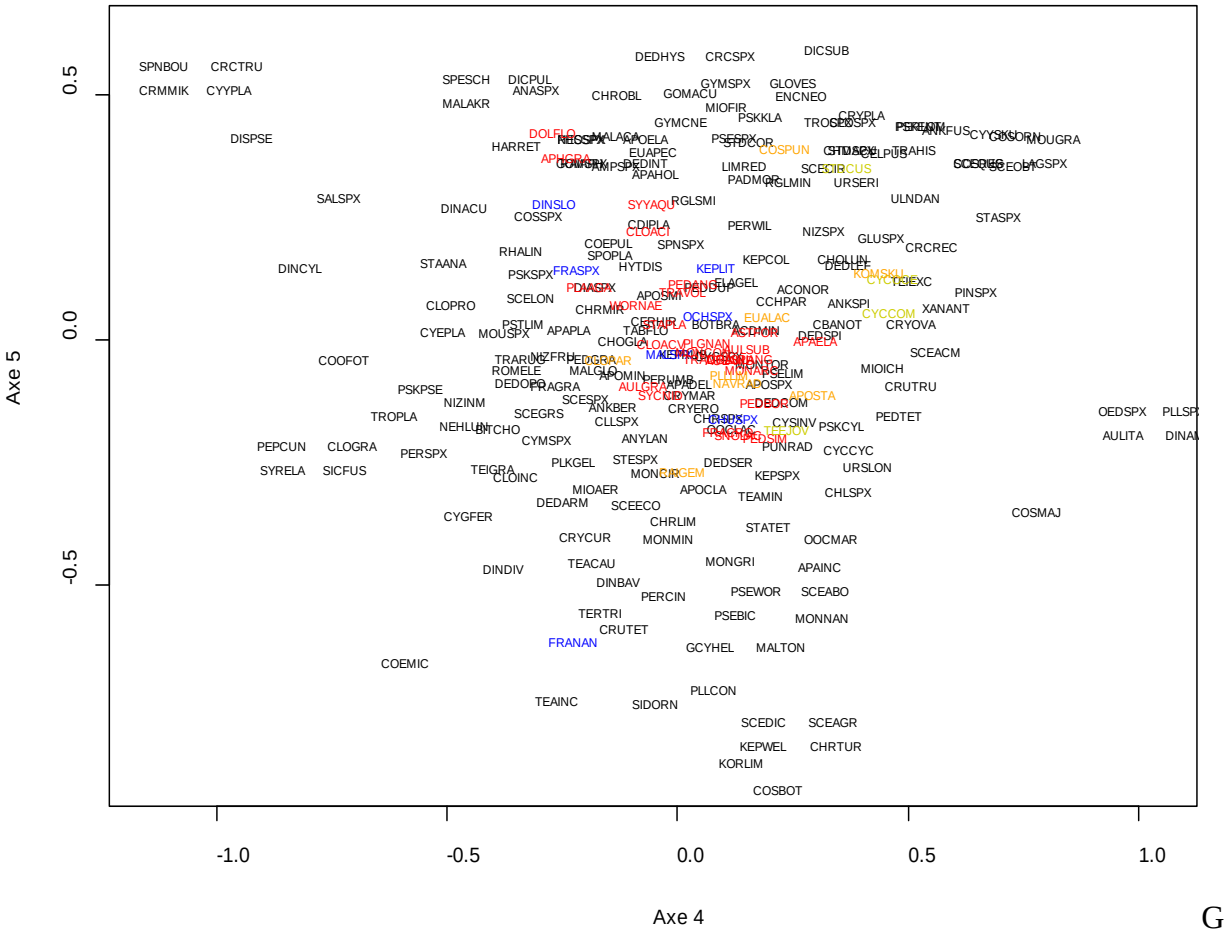


E

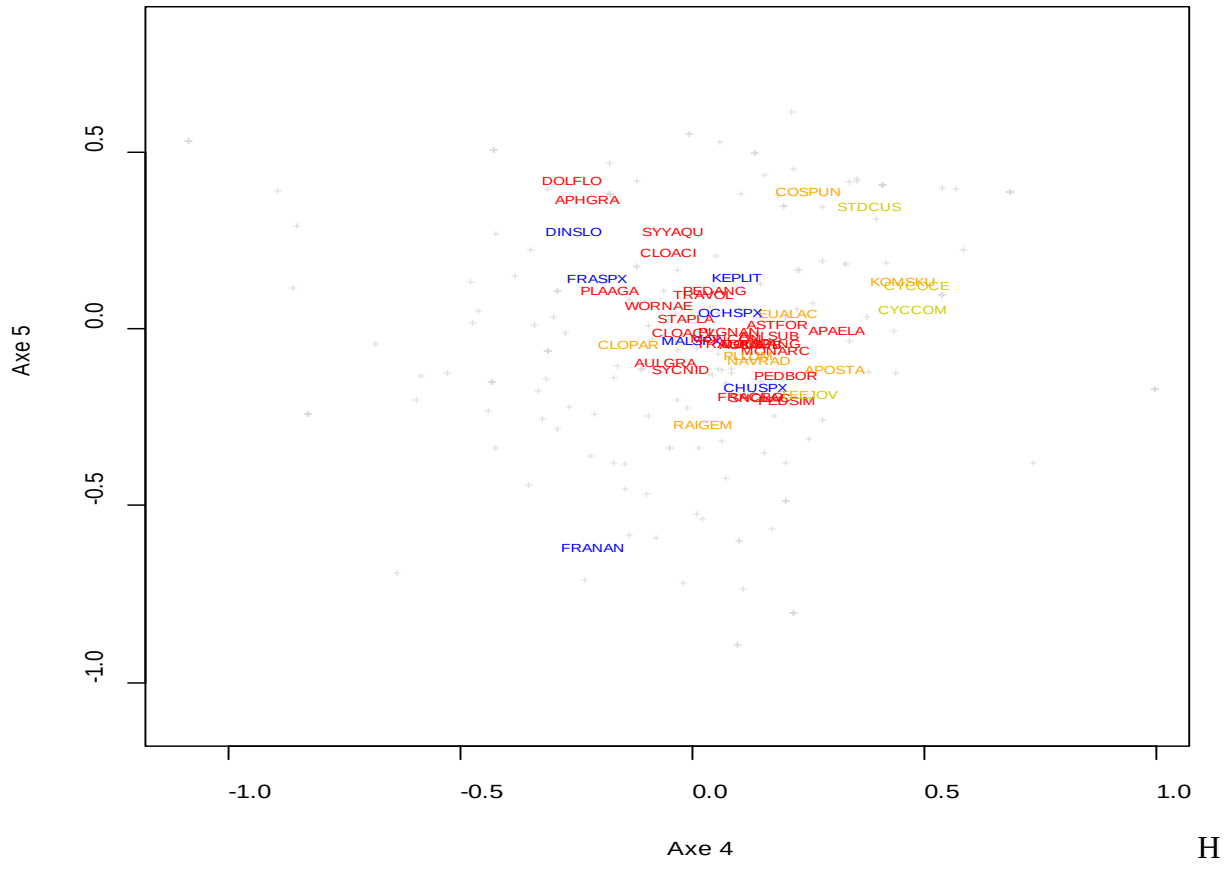
Annexe 18 : ordination des échantillons dans l'espace défini par les axes 4 et 5 de la NMDS sur la répartition des espèces du phytoplancton sur les quatre lacs aquitains. F : projection des sites dont la taille des points est proportionnelle à la biomasse totale des échantillons pour chaque date. G : projection des espèces avec en couleur les espèces indicatrices à chaque campagne (Parentis-Biscarrosse : rouge, Cazaux-Sanguinet : jaune-vert, Hourtin-Carcans : orange, Lacanau : bleu). H : projection des espèces indicatrices de chaque lac pour des raisons de clartés



F

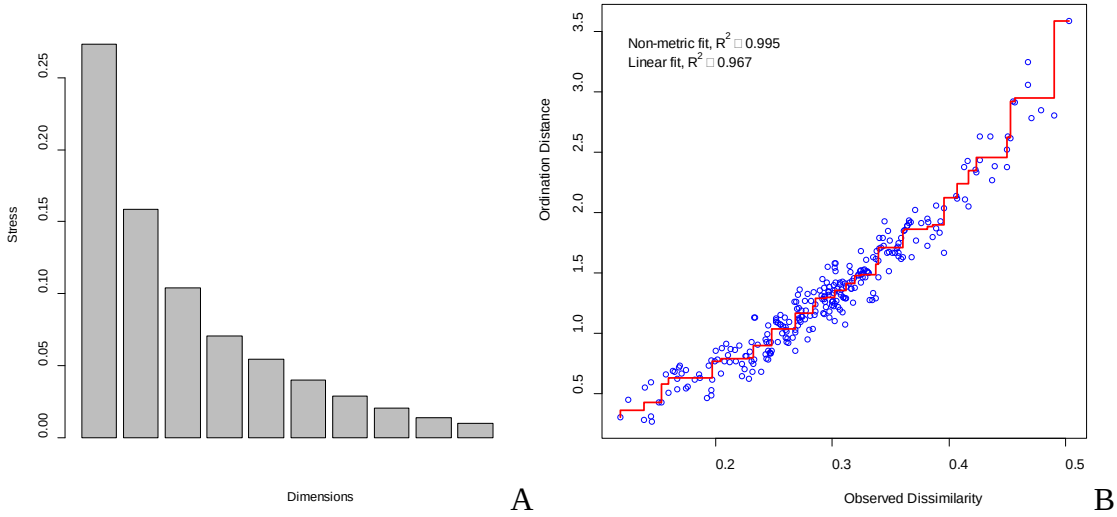

Axe 5
Axe 4
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0
SPNBOU
CRCTRU
CRMMIK
CYYPLA
DISPSE
SALSPX
DINACU
DINCYL
STAANA
COOFOT
PSKPSE
TROPLA
PEPCUN
CLOGRA
SYRELA
SICFUS
PERSPX
CYGFER
COEMIC
SPESCH
DICPUL
ANASPX
MALAKR
HARRET
APHGRA
DOLFLO
DINSLO
COSSPX
RHALIN
FRASPX
PSKSPX
SCELON
CLOPRO
PSTUM
CYEPLA
MOUSPX
APAPLA
ROMELE
MALGLO
PEDGRA
PRAGRA
NIZINM
NEHLUN
SCEGRS
CYMSPX
TEIGRA
CLOINC
PLKGEL
TEAINC
DEDHYS
CRCSPX
DICSUB
GYMSPX
GLOVES
CHROBL
GOMACU
ENCNEO
MIOFIR
GYMCNE
PSKKLA
EUAPEC
APOELA
AMPSPX
APAHOL
LIMRED
PADMOR
RGLMIN
URSERI
ULNDAN
SYYAQU
RGLSMI
CDIPLA
CLOACI
PERWIL
NIZSPX
GLUSPX
CRCREC
COEPUL
SPNSPX
SPOPLA
HYTDIS
KEPLIT
KEPCOL
CHOLLIN
DEDLEE
STASPX
PINSPX
ACONOR
CCHPAR
ANKSPI
CYCCOM
XANANT
CRYOVA
CBANOT
APAELA
SCEACM
MIOICH
CRUTRU
PEDTET
PSKCYL
CYCCYC
URSLON
CHLSPX
TEAMIN
APOSTA
APOSPX
PSELIM
PEDBOR
PUNRAD
CYSINV
KEPSPX
DEDSER
STESPX
ANYLAN
CRYERO
ANKBER
CLLSPX
SCESPX
CRYMAR
SYCID
NAVRAD
PEDLAC
CHUSPX
PLESSIM
RAIGEM
MONGRI
APAINC
DINBAV
PERCIN
PSEWOR
SCEABO
TERTRI
PSEBIC
MONNAN
CRUTET
FRANAN
GCYHEL
MALTON
PLLCON
SIDORN
SCEDIC
SCEAGR
KEPWEL
CHRTUR
KORLIM
COSBOT
TEIEXC
OEDSPX
PLLSPX
AULITA
DINAL
COSMAJ
OOCMAR
STATET
CRYPLA
TROSPX
ANKFUS
CYYSKO
GBSORN
MOUGRA
LAGSPX
COSPUN
STDCUS
TRAHIS
CIRCUS
SCEOBT
CHOLLIN
KOMSKU
CYCCOM
XANANT
CYCOCE
TEIEXC
PINSPX
CBANOT
CRYOVA
SCEACM
MIOICH
CRUTRU
PEDTET
PSKCYL
CYCCYC
URSLON
CHLSPX
COSMAJ
OOCMAR
STATET
APAINC
PSEWOR
SCEABO
MONNAN
PSEBIC
GCYHEL
MALTON
PLLCON
SIDORN
SCEDIC
SCEAGR
KEPWEL
CHRTUR
KORLIM
COSBOT

G


Axe 5
Axe 4
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0
DOLFLO
APHGRA
COSPUN
STDCUS
DINSLO
SYYAQU
CLOACI
FRASPX
KEPLIT
PLAAGA
WORNAE
OCHSPX
STAPLA
ASTFOR
APAELA
CLOPAR
AULGRA
SYCNID
NAVRAD
PEDBOR
APOSTA
CHUSPX
RAIGEM
FRANAN
KOMSKU
CYCOCE
CYCCOM

H

Annexe 19 : A : barplot représentant les valeurs de stress de la NMDS des traits représentant la communauté phytoplanctonique. B : graphique de Shepard à 4 dimensions



Annexe 20 : nombre d'espèce pour chaque lac, toutes dates confondues possédant les traits utilisés pour les tests statistiques.

	Cellule	Colonie	Filament	Biov <10µm	Biov 10.1-100µm	Biov 100.1-1000µm	Biov 1000.1-10000µm
Parentis	130	**93**	**54**	29	68	**106**	60
Cazaux	138	75	26	24	61	92	45
Hourtin	136	92	28	**31**	68	76	67
Lacanau	**178**	90	24	27	**74**	99	**72**

	Biov >10000µm	Nanophyto plancton	Microphyto plancton	Mesophytopl ancton	Macrophytoplan kton	Ellipsoïdes	Cône + demi-sphère
Parentis	14	45	164	**68**	0	0	0
Cazaux	17	**67**	138	33	1	**2**	0
Hourtin	14	61	143	48	**4**	0	**1**
Lacanau	**20**	63	**181**	47	1	0	0

	Forme de *Ceratium*	Forme de Straurastrum	Prisme sur base triangulaire	Sphère	Ellipse rotationnelle	Ellipse aplatie	Double cône
Parentis	4	**12**	2	**34**	71	32	32
Cazaux	**5**	8	**3**	16	69	41	16
Hourtin	**5**	3	1	19	84	47	**27**
Lacanau	**5**	5	2	22	**91**	**50**	**27**

	Parallélépipède	Prisme sur base de parallélogramme	Cymbelloïde	Cylindre	Cylindre oval	motilité	flagelle
Parentis	**27**	2	0	**51**	10	101	58
Cazaux	16	4	0	**51**	8	94	76
Hourtin	19	**9**	**3**	36	2	106	66
Lacanau	19	8	2	43	**18**	**126**	**93**

	aérotope	vacuole contractile	mucilage	akinète	chloroplaste	gaine	tractus
Parentis	**33**	17	70	**15**	210	12	20
Cazaux	2	**19**	55	0	212	12	20
Hourtin	16	17	**77**	0	202	**28**	13
Lacanau	10	**19**	71	0	**258**	19	**30**

	squelette siliceux	lorica	plaques	Ecailles siliceuses	ornementation	protubérance	Paroi lisse
Parentis	54	18	4	**6**	125	105	**165**
Cazaux	56	22	8	**6**	119	91	108
Hourtin	27	20	10	4	107	81	139
Lacanau	**57**	**28**	**15**	5	**143**	**114**	141

	Chlo *b*	Chlo *c*	Xanthophylles	Phycobilines	Toxines	fixation azote atm	Mixotrophe	Sexuée_Asexuée
Parentis	113	97	196	**81**	**28**	**15**	55	165
Cazaux	80	132	196	43	7	0	78	165
Hourtin	**114**	88	190	66	6	0	67	156
Lacanau	112	**146**	**239**	53	8	0	**93**	**198**

Glossaire

Aérotope : vacuole de gaz permettant la flottaison.

Akinète : spore de repos à paroi épaisse formée par la transformation d'une cellule végétative chez les cyanobactéries principalement, avec une paroi évidente, généralement beaucoup plus grande que les autres cellules végétatives et considérées comme des structures de stockage.

Anisogamie : mode de reproduction hétérogame dans lequel les gamètes, tous deux mobiles, sont cependant différents, la cellule femelle étant plus grosse.

Autotrophe : « l'auto-alimentation », capable de synthétiser des composés organiques à partir de substrats inorganiques en utilisant la lumière ou (certaines bactéries) de l'énergie chimique.

Chasse à la tonne : chasse spécifique à la chasse des oies et des anatidés (canards), «La tonne», est une installation fixe au bord d'un plan d'eau dans laquelle le chasseur passe la nuit.

Coenobium : colonie dans laquelle le nombre de cellule est fixé au moment de la formation et qui n'est pas augmenté par la suite; caractéristique de la plupart des membres multicellulaires du groupes des Chlorococcales au sens strict.

Colonie : groupe de cellules individuelles enfermées dans une gaine/enveloppe commune ou assemblées et ayant une forme et un structure caractéristique.

Craste : le terme craste est spécifique au massif landais, En usage depuis des siècles, la craste se généralise au milieu du XIXème siècle afin de faciliter l'écoulement des eaux et rendre possible la mise en culture du pin maritime, Il s'agit d'un réseau de fossé et de petits ruisseaux qui permet de drainer les sols, Les fossés et les crastes jouent un rôle majeur dans la gestion des eaux pluviales, A ce titre ils sont répertoriés dans les schémas directeurs d'assainissement des eaux pluviales des communes et intégrés dans les Plans Locaux d'Urbanisme.

Cystogamie : mode de reproduction par mélange des cytoplasmes mâles et femelles chez certains champignons et certains crustacés.

Filament: cellules uni ou disposés en une ou plusieurs rangées pour former une chaîne ou un fil; dans les algues bleu-vert le terme est souvent utilisé de façon interchangeable avec le mot « trichome » sous des formes qui n'ont pas de gaine; dans les formes avec une gaine il se réfère à un trichome et sa gaine d'investissement.

Hétérocystes : cellule fixatrice d'azote, transparente, à paroi épaisse, qui se forme dans les filaments de certaines cyanobactéries, La paroi est épaisse pour limiter la diffusion de l'oxygène, car la nitrogénase (complexe fixant l'azote) y est sensible.

Isogamie : reproduction par union de deux gamètes mâles et femelles morphologiquement semblables.

Lorica : mot latin pour une cuirasse, appliquée à la partie la plus dure ou à la quasi-totalité de

la surface de certaines algues flagellées, en particulier les euglénophytes et les chrysophytes; la plupart des espèces avec un lorica sont mobiles, mais certains lorica de chrysophytes sont épiphytes.

Mixotrophie : c'est la capacité d'utiliser plusieurs sources de carbone, par autotrophie et hétérotrophie, suivant les conditions environnementales.

Motilité : capacité physiologique à effectuer des mouvements (pattes, flagelles, ailes, muscles).

Monomictique : lacs qui ne basculent qu'une fois par an.

Oogamie : fécondation d'une oosphère immobile, sphérique et remplie de réserves (gamète femelle) par un spermatozoïde mobile, flagellé et petit (gamète mâle) par opposition à l'anisogamie, (L'oogamie est le fait de la plupart des animaux ainsi que de diverses algues, des mousses, des fougères, des gymnospermes dites natrices).

Phénologie : étude scientifique des variations (durée, époque, etc.) que les divers climats font subir à la floraison et à la feuillaison des végétaux.

Polymictique : lacs qui connaissent une stratification thermique estivale instable et facilement détruite par le vent.

Thylacoïdes ou la membrane thylacoïde dans un chloroplaste : sac membraneux aplati contenant la chlorophylle, ou autrement dit, c'est une membrane cellulaire à l'intérieur du chloroplaste de végétaux qui réalise la photosynthèse.

Trichome : agencement linéaire des cellules sans la gaine chez les algues bleues-vertes; le terme est synonyme de filament pour des formes qui ne possèdent jamais de gaine, mais pour celles qui en possèdent une, le filament se compose alors d'un trichome et d'une gaine.

Vacuole contractile: organelle progressivement élargi car elle se remplit de liquide, pour contracter brusquement et provoquer une expulsion.

Zone euphotique (=zone intégrée) : qualifie la couche supérieure d'une masse d'eau dans laquelle pénètre suffisamment de lumière pour assurer le déroulement de la photosynthèse. Il s'agit de la couche d'eau comprise entre la surface et 2,5 fois le disque de Secchi (Z_{eu}= 2,5 * Secchi).