



**HAL**  
open science

## Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles en zone littorale des lacs français

D. Rebiere, Christine Argillier, J.C. Raymond, J.M. Foissy, S. Richard

► **To cite this version:**

D. Rebiere, Christine Argillier, J.C. Raymond, J.M. Foissy, S. Richard. Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles en zone littorale des lacs français. irstea. 2013. hal-02599805


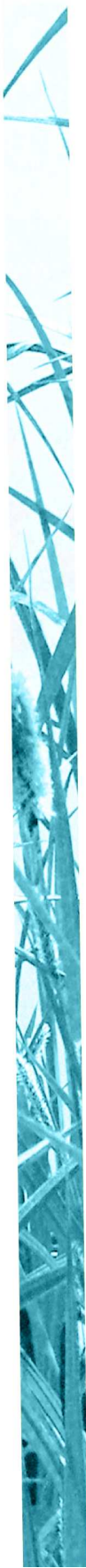
**HAL Id: hal-02599805**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02599805>**

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.



# Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles en zone littorale des lacs français

*Rapport final*

*Delphine REBIERE, Christine ARGILLIER, Irstea,*

*Jean-Claude RAYMOND, Jean-Michel FOISSY, Sylvain RICHARD,  
Onema*

*Janvier 2013*

## Contexte de programmation et de réalisation

---

Depuis 2005, la faune piscicole des lacs français est échantillonnée selon un protocole standardisé (CEN-2005); de même, l'hydromorphologie lacustre et ses altérations sont caractérisées par l'application d'un protocole bien décrit dans la littérature (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006). Les données ainsi obtenues peuvent être utilisées pour analyser la réponse des peuplements de poissons pêchés dans la zone littorale des plans d'eau français à la qualité des habitats (diversité, richesse et altération de la zone littorale). Cette analyse fait l'objet de la présente étude.

## Les auteurs

---

***Delphine REBIERE***

*Ingénieure*

*delphine.rebiere@irstea.fr*

*Irstea - Unité HYAX Hydrobiologie, pôle Onema/Irstea hydroécologie plans d'eau  
3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)  
CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5*

***Christine ARGILLIER***

*Directrice de Recherche*

*christine.argillier@irstea.fr*

*Irstea - Unité HYAX Hydrobiologie, pôle Onema/Irstea hydroécologie plans d'eau  
3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)  
CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5*

## Les correspondants

---

**Onema** : Jean Michel FOISSY, jean-michel.foissy@onema.fr

Jean-Claude RAYMOND, jean-claude.raymond@onema.fr

Sylvain RICHARD, sylvain.richard@onema.fr

**Irstea** : Christine ARGILLIER, christine.argillier@irstea.fr

<b>Droits d'usage :</b>	<i>accès libre</i>
<b>Couverture géographique :</b>	<i>national</i>
<b>Niveau géographique :</b>	<i>France</i>
<b>Niveau de lecture:</b>	<i>Professionnels, experts</i>
<b>Nature de la ressource :</b>	<i>Document</i>

Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles  
en zone littorale des lacs français

Rapport final.

Rebiere D., Argillier C., Raymond J.-C., Foissy J.-M., Richard S.

## Sommaire

<b>RESUME</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>6</b>
<b>1. MATERIELS ET METHODES</b> .....	<b>7</b>
1.1. SITES D'ETUDES .....	7
1.2. SELECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES .....	8
1.3. SELECTION DES PRESSIONS ANTHROPIQUES.....	8
1.4. ÉCHANTILLONNAGES PISCICOLES.....	9
1.5. CHOIX DES METRIQUES.....	10
1.6. APPROCHES STATISTIQUES .....	12
1.6.1. Comparaison des valeurs prises par les métriques dans les différentes zones de pêche .....	12
1.6.2. Comparaison des valeurs prises par les métriques en zone littorale dans les différents milieux.....	12
1.6.3. Modélisation de la réponse des métriques à la qualité et/ ou à l'altération des habitats .....	12
<b>2. RESULTATS</b> .....	<b>13</b>
2.1. ETUDE DES CAPTURES SUR L'ENSEMBLE DES LACS PECHES .....	13
2.1.1. Description générale des peuplements.....	13
2.1.2. Comparaisons des valeurs prises par les métriques dans les différentes zones de pêche.....	15
2.1.3. Comparaisons des valeurs prises par les métriques en zone littorale dans les différents milieux.....	19
2.2. ÉTUDE DES CAPTURES SUR LES LACS NATURELS ET LES RETENUES ECHANTILLONNES A L'AIDE DU LAKE HABITAT SURVEY .....	22
2.2.1. Description générale des peuplements.....	22
2.2.2. Sélection des métriques piscicoles.....	23
2.2.3. Sensibilité des métriques piscicoles à la qualité des habitats.....	24
2.2.4. Analyses des corrélations simples entre les métriques et l'altération des habitats.....	24
2.2.5. Modélisation de la réponse des métriques à l'altération des habitats.....	25
<b>DISCUSSION</b> .....	<b>26</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>29</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>30</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>34</b>

Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles  
en zone littorale des lacs français

Rebiere D., Argillier C., Raymond J.-C., Foissy J.-M., Richard S.

## Résumé

---

La présente étude a pour but de décrire les peuplements de poissons rencontrés dans les plans d'eau et en particulier en zone littorale, puis de modéliser les réponses de ces peuplements à l'altération de l'hydromorphologie en tenant compte de la variabilité naturelle et des pressions qui s'exercent sur les bassins versants des lacs.

Les peuplements piscicoles des lacs français sont suivis depuis 2005 selon un protocole d'échantillonnage normalisé (C.E.N. 2005). A partir de ces pêches, l'ichtyofaune a été caractérisée par diverses métriques d'abondance et de composition (tolérance, reproduction, trophie, origine, effectifs; biomasse et diversité). L'hydromorphologie de la majorité de ces plans d'eau a été évaluée à l'aide du protocole dit "Lake Habitat Survey" (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006). Ce dernier permet de caractériser les habitats avec le Lake Habitat Quality Assessment Score (LHQA), indice rendant compte de la qualité des zones littorales et le Lake Habitat Modification Score (LHMS) caractérisant leurs altérations.

Nous avons montré que les assemblages de la zone littorale sont caractérisés par les plus fortes valeurs de métriques en termes de richesse spécifique, d'effectifs capturés et de biomasse pour les lacs naturels et les retenues. Cependant, sur plus de 90% des métriques, aucune différence significative n'est observée entre les assemblages des différentes zones pour les lacs obtenus par creusement.

Peu de métriques piscicoles sont corrélées aux variables caractérisant les habitats pour les lacs naturels, et aucune en ce qui concerne les retenues. La modélisation, par arbres de régression, n'a pas permis d'établir des relations entre les métriques calculées à partir des captures en zone littorale et la dégradation des habitats de cette même zone tant pour les lacs naturels que pour les retenues.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ces résultats et des perspectives d'analyses ont été avancées aussi bien au niveau de l'échantillonnage que des analyses statistiques (calculs de nouvelles métriques piscicoles, utilisation de variables explicatives différentes...).

## Mots clés (thématique et géographique)

---

Peuplement piscicole, métrique, Lake Habitat Survey, pressions anthropiques, lacs naturel, retenue, zone littorale, corrélation, arbre de régression.

Impacts des pressions anthropiques locales sur les peuplements piscicoles  
en zone littorale des lacs français

Rebiere D., Argillier C., Raymond J.-C., Foissy J.-M., Richard S.

## Abstract

This study aims to describe the fish assemblages of lakes and reservoirs, particularly in littoral areas. The responses of fish assemblages to impaired hydromorphology will be modeled taking into account the natural variability and pressures on the catchment of the lakes.

Fish communities of French lakes have been monitored since 2005 by a standardized sampling protocol (CEN 2005). With these fish data, the fish fauna was characterized by different metrics related to composition and abundance (tolerance, reproduction, trophy, origin, biomass, number of fish and diversity). The hydro-morphology of the majority of these water bodies was assessed using the Lake Habitat Survey method (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006). This protocol allows to characterize habitats with the Lake Habitat Quality Assessment Score (LHQA), index reflecting the quality of the littoral zone and the Lake Habitat Modification Score (LHMS) characterizing its alterations.

We showed that the assemblages in the littoral zone are characterized by the highest values of metrics in terms of species richness, biomass and occurrence for natural lakes and reservoirs. However, no significant difference was observed between assemblages of different areas for lakes obtained by digging.

No metrics tested showed a significant response to the quality or alteration of the hydromorphology both in natural lakes and reservoirs. Few fish metrics are correlated with variables characterizing habitat for natural lakes, and none for reservoirs. Modeling by regression trees, failed to establish relationships between metrics derived from littoral zone and the alteration of habitat for both natural lakes as reservoirs.

These results were discussed and proposals were made as well at nets sampling as the statistical analyzes (calculation of new fish metrics, using different variables ...).

## Key words (thematic and geographical area)

Fish community, metric, Lake Habitat Survey, anthropogenic pressure, natural lake, reservoirs, littoral zone, correlation, tree regression.

## Introduction

Les milieux lentiques regroupent les lacs d'origine naturelle et artificielle. Ces derniers se divisent en deux groupes : ceux créés sur le lit d'un cours d'eau et ceux obtenus par creusement.

Les lacs remplissent des fonctions socio-économiques (alimentation en eau potable, pêcheries, activités touristiques, agréments...) (Schmieder, 2004) et écologiques (cycle du carbone, épuration...). De plus, ils abritent une biocénose diversifiée. Le maintien de ces fonctions nécessite la préservation ou la restauration de la qualité de ces écosystèmes souvent impactés par de nombreuses activités anthropiques (Baron et al., 2002; Mensing et al., 1998). La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) définit un contexte réglementaire dans le but de protéger et/ou améliorer l'intégrité biologique de ces masses d'eau au travers de l'évaluation de l'état écologique.

L'ichtyofaune est un des compartiments biologiques qui peut contribuer à définir cet état écologique. En effet, les poissons sont utilisés en bioindication lacustre au regard des caractéristiques suivantes (Karr et al., 1986; Simon, 1991) :

- ils intègrent une variabilité environnementale sur de larges échelles d'espace et de temps du fait de leur capacité de déplacement et de leur longévité ;
- ils sont à la fois sensibles à la qualité de l'eau et aux altérations de l'habitat en raison de leurs cycles de développement (site de reproduction, de croissance, de repos et de refuge) ;
- ils se situent au sommet des chaînes trophiques aquatiques et sont donc sensibles aux altérations des niveaux trophiques inférieurs ;
- leurs exigences écologiques sont relativement bien connues.

La composition et la structure de l'ichtyofaune découlent d'interactions entre des facteurs biotiques et abiotiques (Jackson et al., 2001; Olden et al., 2001). Il a été démontré que les pressions exercées sur les lacs peuvent fortement modifier leur qualité hydromorphologique (Acreman et al., 2005; Bragg et al., 2003; Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006; Winfield, 2004) principalement au sein de la zone littorale (De Bortoli and Argillier, 2006). L'ichtyofaune occupe cette zone de façon permanente ou occasionnelle selon les échelles temporelles (journée ou saison), pour se nourrir, se reproduire ou se protéger des prédateurs. Des relations ont été mises en évidence entre des descripteurs des peuplements et des variables d'habitat telles que la nature du substrat, la présence d'abris (Benson and Magnuson, 1992; Jennings et al., 1999; Keast, 1978) ou l'indice de développement des berges (SLDF) qui est un indicateur plus synthétique de l'importance de la zone littorale (Eadie and Keast, 1984; Scheuerell and Schindler, 2004; Tonn and Magnuson, 1982). L'augmentation de la richesse spécifique avec la diversité des habitats observée de manière générale s'expliquerait par un effet direct du fait de l'augmentation du nombre de niches disponibles et indirectement par une diminution des interactions biotiques (Crowder and Cooper, 1982; Everett and Ruiz, 1993; Persson, 1993).

La présente étude a pour but d'évaluer la réponse des peuplements piscicoles observés en zone littorale à l'altération des habitats sur les lacs français. L'hypothèse de travail est la suivante : les peuplements de poissons capturés en zone littorale sont à même de rendre compte de la diversité et de la richesse des habitats et de l'altération de l'hydromorphologie. D'une part, nous allons vérifier que la zone littorale concentre une part significative de l'information sur la structure de l'ichtyofaune. Les relations entre l'ichtyofaune capturée en zone littorale, la qualité des habitats et les pressions anthropiques locales, seront ensuite explorées et comparées entre les lacs naturels et les retenues.



## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Sites d'études

Les lacs ne possèdent pas les mêmes caractéristiques selon leur origine naturelle ou artificielle et les réponses des métriques aux pressions anthropiques diffèrent selon le type de lacs (Argillier et al., 2002a; Argillier et al., 2002b; Irz et al., 2006; Launois et al., 2010; Wetzel, 1990). Dans cette étude, les lacs français ont, par conséquent, été analysés de manière distincte selon la typologie DCE (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2005) :

- LN : lacs naturels (typologie DCE : N1-N14) ;
- A : lacs artificiels obtenus par creusement (typologie DCE : A13-A16) ;
- R : retenues sur lit principal d'un cours d'eau (typologie DCE : A1-A12).

Les données sur les poissons utilisées concernent 237 plans d'eau (51 LN, 25 A, 161 R), échantillonnés entre 2005 et 2011, selon le protocole CEN (Figure 1, Annexe 1). Pour les lacs pêchés plusieurs fois, seule la dernière pêche a été prise en compte.

Les variables environnementales et les pressions sont disponibles pour l'ensemble des lacs DCE pêchés. En revanche, tous n'ont pas été prospectés avec le protocole LHS (Lake habitat Survey) ; ce protocole n'a été mis en œuvre que sur 42 lacs naturels et 145 retenues (Figure 1, Annexe 1). Ce dernier n'a été appliqué que sur peu de lacs artificiels et les données ne sont, par conséquent, pas suffisantes pour analyser les réponses des métriques sur ces milieux.

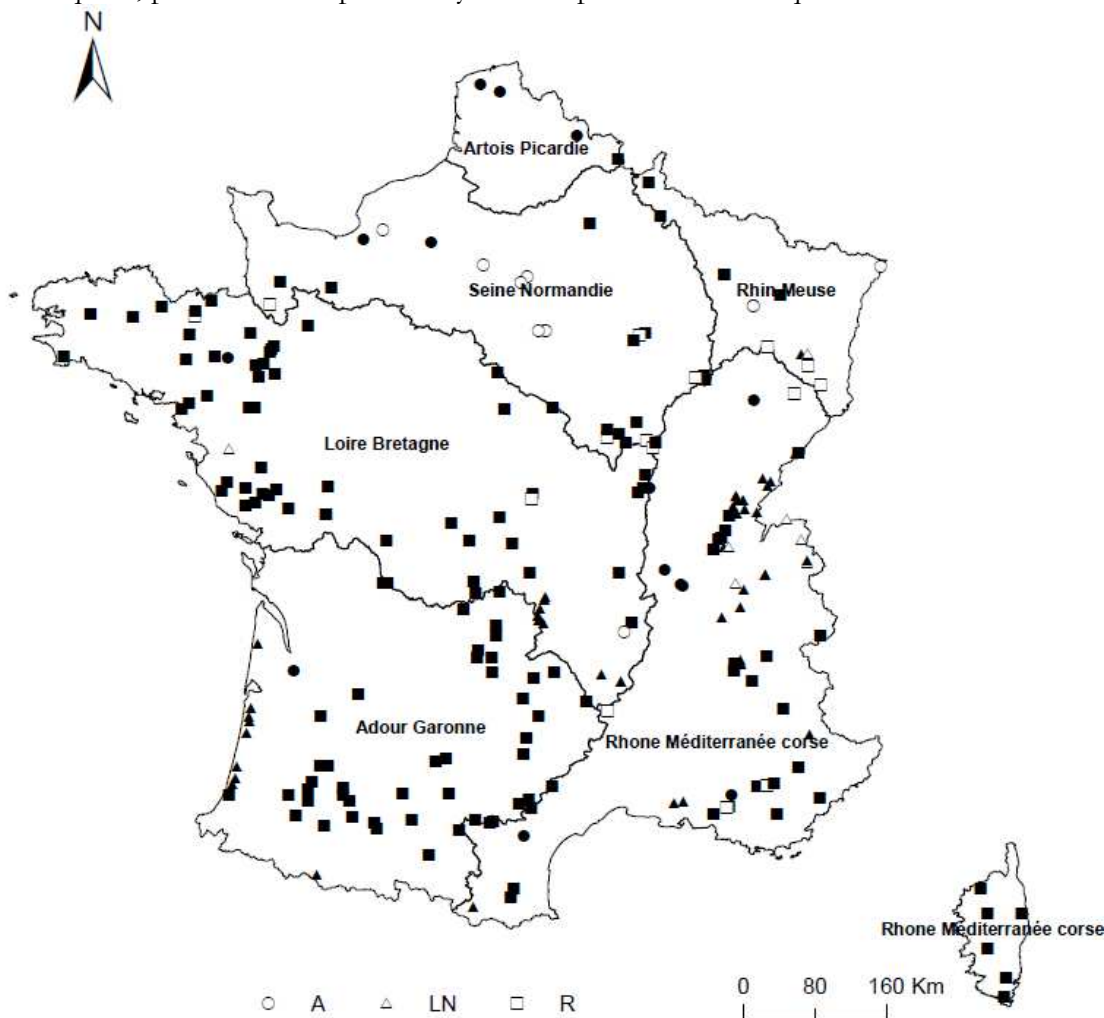


Figure 1. Localisation des 237 lacs étudiés (en noir, les lacs prospectés avec le Lake Habitat Survey)



## 1.2. Sélection des variables environnementales

Les variables environnementales retenues dans ce rapport sont relatives à la structure et au fonctionnement de la cuvette lacustre et à l'environnement à proximité du lac (bassin versant, corridor rivulaire). Ce choix a été orienté par des travaux antérieurs, notamment sur la détermination des seuils de qualité des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie sur les plans d'eau français (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012) et par la disponibilité des données. Les variables possédant plus de 3 valeurs manquantes ont été supprimées du jeu de données. Ainsi, 155 variables ont été conservées pour les lacs naturels et 149 pour les retenues (Annexe 2).

Certaines de ces variables sont connues pour influencer les peuplements piscicoles (Tableau 1). Les paramètres liés à la structure du lac, tels que sa surface, sa profondeur maximale, le facteur de développement des berges (SLDF) ou de la cuvette (Vd), fournissent des informations sur la disponibilité en habitats littoraux (Argillier et al., 2002a; Argillier et al., 2002b; De Bortoli and Argillier, 2006) et indirectement sur le taux d'oxygène dissous du lac (Hondzo and Stefan, 1996).

Les exigences des poissons sont liées aux températures de l'eau (Daufresne and Boet, 2007; Irz et al., 2007). Cependant, ces données n'étant pas disponibles, les températures de l'air ont été utilisées. Elles ont été obtenues en application du modèle SAFRAN (Vidal et al., 2009).

Le temps de séjour des eaux influence fortement les processus biogéochimiques (De Bortoli and Argillier, 2006). Il a été estimé à partir du volume du lac et des débits entrant, obtenus en application du modèle LOIEAU (Folton and Lavabre, 2007).

**Tableau 1. Caractéristiques de quelques variables naturelles structurant la faune piscicole**

Variables environnementales	LN (n = 42)			R (n= 145)		
	mean	min	max	mean	min	max
Superficie du lac (km <sup>2</sup> )	6.03	0.11	57.57	2.23	0.34	27.45
Surface de drainage du bassin versant (km <sup>2</sup> )	130.85	0.37	1064.76	542.93	1.39	10479.98
Profondeur maximale (m)	26.99	2.00	145.00	27.98	1.20	135.00
Facteur de développement des rives (SLDF)	1.63	1.01	3.89	3.42	1.09	10.00
Facteur de forme de la cuvette (Vd)	1.47	0.30	2.68	1.21	0.36	2.01
Température moyenne de l'air sur 10 ans	8.97	1.82	14.79	11.18	2.96	15.56
Temps de séjour estimé par Loieau (années)	3.90	0.01	63.42	0.96	0.00043	36.83

Afin de qualifier les habitats littoraux, le score du Lake Habitat Quality Assessment et ses sous-scores, calculés en application du protocole LHS (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006) ont été pris en compte : Riparian Score, Shore Score, Littoral Score, Whole Lake Score, (Tableau 2, Annexe 3). La note maximale est attribuée à une zone très diversifiée et favorable au développement et au maintien de l'activité biologique.

**Tableau 2. Caractéristiques de la qualité des habitats selon le Lake Habitat Quality Assessment**

Variables qualité des habitats	LN (n = 42)			R (n= 145)		
	mean	min	max	mean	min	max
LHQA	61.90	45	78	54.90	26	79
Riparian Score	10.05	4	16	9.86	3	15
Shore Score	12.38	3	20	10.98	0	23
Littoral Score	20.83	13	26	17.66	6	29
Whole Lake Score	18.64	5	25	16.40	2	30

## 1.3. Sélection des pressions anthropiques

De la même manière que pour les variables environnementales, le choix des variables reflétant les pressions anthropiques s'est appuyé sur des études antérieures (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012; De Bortoli and Argillier, 2006; Launois, 2011). Ce choix tient aussi compte de la disponibilité des données à l'échelle nationale. Un total de 180 variables a été comptabilisé

tant pour les lacs naturels que pour les retenues (Annexe 4). Ces variables dérivent, dans leur majorité, des types d'occupation des sols à l'échelle du bassin versant et de la zone rivulaire, décliné en taux, en unités surfaciques ou rapportées à la surface ou au volume du lac.

Les données d'occupation des sols reflètent la fragmentation du bassin versant et de la zone rivulaire (Forman and Alexander, 1998) et la dynamique des rejets chimiques dans les lacs (Müller et al., 1998; Pitt et al., 1995; Sliva and Williams, 2001; Tong and Chen, 2002); elles sont issues de Corine Land Cover 2006 et/ou de la BD TOPO pour le réseau routier et ferré.

Le surplus en azote, obtenu en application du modèle NOPOLU (Commissariat Général au Développement Durable, 2010) a également été pris en compte pour appréhender l'enrichissement en nutriments.

Quelques pressions mesurées à l'échelle du bassin versant sont présentées dans le Tableau 3 :

**Tableau 3. Caractéristiques de quelques pressions subies par les lacs à l'échelle du bassin versant**

Pressions	LN (n = 42)			R (n= 145)		
	mean	min	max	mean	min	max
Proportion en surface agricole (%)	26.79	0.00	93.80	56.80	0.00	99.99
Proportion en surface urbaine (%)	3.80	0.00	14.70	2.71	0.00	62.09
Densité de population (hab/km <sup>2</sup> )	46.05	0.00	294.60	41.24	0.50	1142.94
Surplus en azote (T)	78.02	0.31	869.36	1144.51	1.15	38713.46

L'altération des habitats a été caractérisée à l'aide du Lake Habitat Modification Score (LHMS), obtenu à partir du LHS (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006). Cet indice permet d'évaluer la dégradation des habitats lacustres. Il peut atteindre une note maximale de 42 qui correspond à des pressions anthropiques maximales (Alleaume et al., 2009; Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006). Il est obtenu en sommant les scores les plus déclassants pour chaque pression. Les valeurs maximales des scores attribuées à chaque pression reflètent le plus haut degré de dégradation. Ce sont les sous-scores de cet indice qui ont été utilisés dans cette étude : Shore Zone Modification, Shore Zone Intensive Use, In Lake Use, Hydrology, Sediment Regime et Nuisance Species (Tableau 4, Annexe 5).

Le marnage est aussi généralement considéré comme une pression locale d'altération des habitats. Il a des effets néfastes sur les conditions d'alimentation des poissons, d'abri, de repos et de reproduction (Winfield, 2004). Cependant, cette variable n'a pas pu être utilisée lors de la phase de modélisation puisque les informations proviennent de sources diverses, sont incertaines et souvent manquantes.

**Tableau 4. Caractéristiques de l'altération des habitats selon le Lake Habitat Modification Score**

Variables altérations des habitats	LN (n = 42)			R (n= 145)		
	mean	min	max	mean	min	max
LHMS	19.76	0	36	18.22	2	36
Shore Zone Modification	2.43	0	8	1.34	0	8
Shore Zone Intensive Use	4.48	0	8	3.93	0	8
In Lake Use	5.43	0	8	5.43	0	8
Hydrology	2.71	0	8	5.39	0	8
Sediment Regime	3.52	0	6	1.41	0	6
Nuisance Species	1.19	0	4	0.72	0	4

#### 1.4. Échantillonnages piscicoles

Les données poissons ont été obtenues en application du protocole d'échantillonnage en milieu lacustre normalisé par le Comité Européen de Normalisation (C.E.N. 2005). Ce protocole implique l'utilisation de filets multi-mailles benthiques (posés sur le fond) et pélagiques (dans la colonne d'eau). Les filets benthiques sont caractérisés par une longueur de 30 m, une hauteur de 1,5 m et une série de mailles de douze dimensions différentes (de 5 à 55 mm), suivant une progression géométrique avec un facteur de

1,25. La sélectivité de chaque maille est ainsi constante (Appelberg et al., 1995). Les filets pélagiques ont une longueur de 27,5 m et une hauteur de 6 m. Leur structure est identique à celle des filets benthiques, excepté qu'ils ne comportent pas de mailles de 5 mm.

Les lacs échantillonnés ont été divisés en strates de profondeur et les échantillonnages ont été effectués de façon aléatoire au sein de chaque strate. Cette sélection aléatoire des sites de pose des filets est réalisée avant la pêche à l'aide de cartes bathymétriques. L'effort de pêche est déterminé par la superficie et la profondeur du lac, de sorte que toutes les strates soient échantillonnées. Les filets pélagiques ne sont utilisés que dans les lacs ayant une profondeur maximale supérieure à 10 m. Ils sont posés dans la colonne d'eau de la zone la plus profonde. La première nuit, ils sont installés dans une tranche d'eau de profondeur de 0 à 6 m, puis la seconde nuit, ils sont abaissés à une profondeur de 6 à 12 m, et ainsi de suite jusqu'à 70 m ou à une profondeur d'anoxie vérifiée.

L'application du protocole a lieu pendant l'été (juin-octobre), lorsque la température des eaux de surface est supérieure à 15 °C. Les filets sont posés avant le crépuscule et relevés environ 12 heures après. Ceci permet d'éviter la saturation des filets et que les poissons ne se décomposent tout en encadrant les périodes d'activité maximale des poissons.

Les poissons sont identifiés à l'espèce et comptés. Les données obtenues sont, par conséquent, homogènes et comparables entre les lacs. Elles sont bancarisées dans une base gérée provisoirement par le Pôle Onema/Irstea à Aix-en-Provence.

Dans cette étude, les poissons capturés ont été analysés en distinguant plusieurs zones :

- la zone littorale/**ZL** (captures dans la strate de profondeur inférieure à 3 m, à l'aide des filets benthiques) ;
- la zone benthique/**ZB** (captures dans les strates de profondeurs comprises entre 3 et plus de 75 m, à l'aide des filets benthiques) ;
- la zone de plus grande profondeur que l'on appellera zone pélagique/**ZP** car elle comprend majoritairement les poissons de la zone pélagique (captures à l'aide des filets pélagiques) ;
- la totalité du lac/**ZA** (ensemble des captures toutes strates et filets confondus)

### 1.5. Choix des métriques

Les métriques calculées pour décrire les peuplements piscicoles ont été sélectionnées à partir de la littérature (Argillier, 2007; Karr, 1981; Karr et al., 1986; Launois et al., 2010; Launois et al., 2011). Les mesures sont regroupées en quatre types : métriques fonctionnelles et taxonomiques, abondance globale, diversité (

Tableau 5). Les espèces capturées ont été classées en guildes fonctionnelles (Annexe 6) à partir d'études antérieures, (Keith and Allardi, 1997; Kottelat and Freyhof, 2007; Launois et al., 2010; Launois et al., 2011) et des avis d'experts consignés dans la base européenne WISER.

Les espèces hybrides, celles définies uniquement au genre et celles dont l'occurrence est inférieure à 5% ont été exclues du calcul des métriques. Les trois formes de carpe *Cyprinus carpio* (cuir, commune et miroir) ont été considérées comme une seule et même espèce, de même que la truite fario *Salmo trutta fario* et la truite lacustre *Salmo trutta lacustris*.

L'effort de pêche a été défini par le produit du nombre de filets, du temps de pose réel (h) et de la surface du filet (m<sup>2</sup>). Nous avons pris le parti d'utiliser le temps de pose réel pour le calcul de l'effort de pêche du fait qu'il peut être différent du temps de pose standard correspondant à 12h (min : 6.76 h, max : 16.55 h). Il ne nous paraît en effet pas opportun de dégrader la qualité d'une variable connue (et donc d'induire de la variabilité dans les modèles), même si les résultats de l'analyse ne devraient pas être très fortement affectés par ce choix.

**Tableau 5. Critères et métriques utilisées pour caractériser les peuplements piscicoles**

Métriques	Classes - abréviations		Définitions
<b>Guilde de tolérance</b>	Tolérants	OTol	Espèces insensibles à tout impact dû aux altérations du régime hydrologique, du flux des nutriments, de la structure de l'habitat et de la chimie de l'eau
	Intolérants	OIntol	Espèces dont la perte est une réponse à la dégradation de l'état écologique, alors que le nombre d'espèces tolérantes tend à augmenter avec le degré de perturbation
<b>Guilde de reproduction</b>	Phytolithophiles	PhytLith	Espèces qui pondent indifféremment sur des substrats minéraux ou végétaux
	Lithophiles	Lith	Espèces nécessitant des substrats minéralisés pour se reproduire
	Phytophiles	Phyto	Espèces nécessitant des substrats végétalisés pour se reproduire et dont les alevins ne sont pas photophobiques
<b>Guilde trophique</b>	Omnivores	Omni	Espèces se nourrissant à la fois d'animaux et de végétaux
	Invertivores	Invert	Espèces se nourrissant majoritairement d'invertébrés/insectes
	Planctivores	Plankt	Espèces se nourrissant principalement de zooplancton et/ou phytoplancton
	Piscivores	Pisc	Espèces se nourrissant de plus de 75 % de poissons à l'âge adulte
<b>Nativité</b>	Exotiques	Exo	Espèces considérées comme non natives en Europe
<b>Taxonomie</b>	<i>Cyprinidae</i>	Cypr	Espèces appartenant à la famille des <i>Cyprinidae</i>
	<i>Percidae</i>	Perc	Espèces appartenant à la famille des <i>Percidae</i>
	<i>Cyprinidae/Percidae</i>	Cypr_Perc	
	Gardon/Perche	G_P	
	Captures par espèce	Nb_xxx	Nombre d'individus capturés par unité d'effort de pêche pour une espèce donnée
	Biomasse par espèce	B_xxx	Biomasse par unité d'effort de pêche pour une espèce donnée
<b>Abondance globale</b>	CPUE	CPUE	Nombre d'individus capturés par unité d'effort de pêche
	BPUE	BPUE	Biomasse par unité d'effort de pêche
	Biomasse moyenne	AB	BPUE/CPUE - donne une idée du poids moyen des individus
<b>Diversité</b>	Richesse spécifique	RS	Nombre d'espèces présentes par lac
	Indice de Shannon	SWI	Prend en compte la richesse spécifique et l'abondance relative de chaque espèce, caractérise l'équilibre écologique du peuplement
	Indice de Simpson	SI	Mesure la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard appartiennent à la même espèce

Pour chaque caractéristique fonctionnelle et taxonomique (exceptée pour les nombres d'individus et la biomasse par unité d'effort par espèce), six mesures sont calculées :

- le nombre d'espèces partageant un trait (Sp\_trait), excepté pour la métrique G\_P ;
- le nombre d'espèces partageant un trait divisé par le nombre total d'espèces (Sp\_trait\_P100), excepté pour la métrique G\_P et Cypr\_Perc ;
- le nombre d'individus partageant un trait capturés par unité d'effort (Nb\_trait) ;
- le nombre d'individus partageant un trait divisé par le nombre total d'individus (Nb\_trait\_P100), excepté pour la métrique G\_P et Cypr\_Perc ;
- la biomasse des individus partageant un trait capturés par unité d'effort (B\_trait) ;
- la biomasse des individus partageant un trait divisé par la biomasse totale (B\_trait\_P100), excepté pour la métrique G\_P et Cypr\_Perc ;

## 1.6. Approches statistiques

### 1.6.1. Comparaison des valeurs prises par les métriques dans les différentes zones de pêche

Sur les 237 lacs pêchés, les valeurs des métriques piscicoles ont été comparées entre la zone littorale (ZL) et (i) la zone benthique (ZB), (ii) la zone pélagique (ZP) et (iii) l'ensemble du lac (ZA). Ces analyses ont été reproduites pour chaque type de plans d'eau.

Les métriques ne suivant pas une distribution du type Gaussien des tests non paramétriques ont été choisis : tests de Kruskal. Ils comparent les médianes entre les groupes (ici les zones). En cas de différences significatives entre les groupes, des tests de comparaisons deux à deux de Wilcoxon ont été réalisés, ajustés selon la méthode de Bonferroni.

### 1.6.2. Comparaison des valeurs prises par les métriques en zone littorale dans les différents milieux

Les valeurs des métriques piscicoles calculées en zone littorale ont été comparées entre les trois types de lacs à l'aide de tests non paramétriques de comparaisons. En cas de différences significatives entre les groupes, des tests de comparaisons deux à deux de Wilcoxon ont été réalisés, ajustés selon la méthode de Bonferroni.

### 1.6.3. Modélisation de la réponse des métriques à la qualité et/ou à l'altération des habitats

Cette partie de l'étude ne concerne que les captures de la zone littorale. Dans un premier temps, nous avons sélectionné les métriques pertinentes pour étudier leurs réponses à l'altération des habitats ; les valeurs des métriques doivent prendre une large gamme de variance avec peu d'outliers (Hering et al., 2006a). Cela a été vérifié par une analyse graphique par boxplot (Figure 2).



Figure 2. Distribution de la richesse spécifique en invertivores sur les lacs naturels (à gauche) et de la biomasse de goujons sur les retenues (à droite)

Nous avons vérifié si les métriques piscicoles étaient sensibles à la qualité des habitats décrite par les sous-scores du LHQA, à partir d'une matrice de corrélation de Spearman (méthode non paramétrique).

De la même manière, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les métriques et l'altération des habitats décrites par les sous-scores du LHMS à l'aide d'une matrice de corrélation de Spearman.

Enfin, des arbres de régressions ont été construits pour évaluer la réponse des métriques aux pressions (globales et locales), à l'environnement naturel et à la qualité des habitats, appelés également prédicteurs. C'est une méthode non paramétrique qui, par conséquent, n'est pas perturbée par la distribution non linéaire ou non monotone des prédicteurs, leur colinéarité ou leur interaction (Breiman, 1984; De'ath and Fabricius, 2000). La qualité principale des arbres est la facilité et la robustesse de la construction et de l'interprétation. L'arbre de décision se lit de haut en bas depuis la racine et de gauche à droite (condition logique respectée vers la gauche, non respectée vers la droite). Le principe est de construire un arbre dichotomique de décision en sélectionnant les prédicteurs les plus discriminants pour partitionner progressivement les métriques piscicoles (Figure 3).



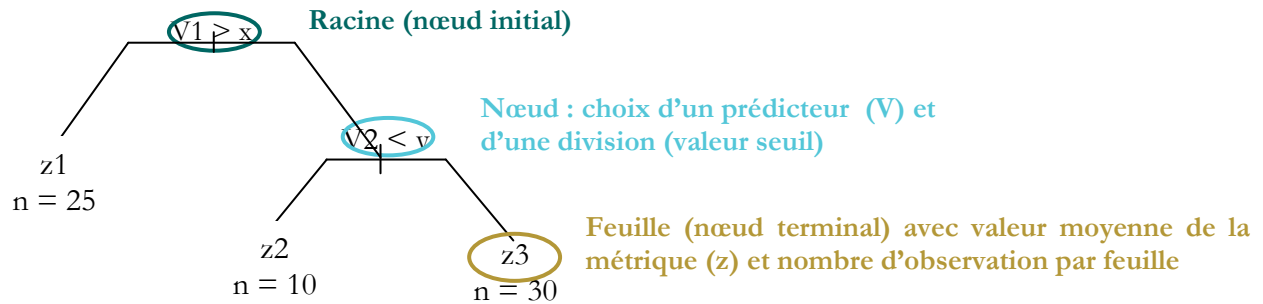


Figure 3. Exemple fictif d'un arbre de régression

Les arbres ainsi construits sont caractérisés par (i) l'erreur du modèle qui décroît asymptotiquement avec la taille de l'arbre et (ii) l'erreur quadratique moyenne calculée sur le jeu de validation qui diminue lors des premières divisions et augmente à nouveau quand l'arbre devient trop grand (complexe).

Pour chaque métrique, l'arbre le plus parcimonieux est choisi par « post-élagage ». Cela consiste à réduire l'arbre ayant un nombre de nœuds qui minimise l'erreur quadratique moyenne. Un modèle est conservé si :

- l'erreur de validation croisée décroît lors des premières divisions ;
- l'erreur de l'arbre élagué est inférieure à 25 %,
- le nombre de paramètres est  $\leq$  au nombre d'observations/10.

La performance des modèles répondant à ces conditions a été évaluée selon la méthode du Leave One Out (LOO). Lorsque le coefficient de corrélation entre les valeurs observées et attendues des métriques était supérieur à 0.8, le modèle était validé.

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel « R » (Ihaka and Gentleman, 1996; R Development Core Team, 2012) et du package « rpart » (Therneau et al., 2012).

## 2. Résultats

### 2.1. Etude des captures sur l'ensemble des lacs pêchés

#### 2.1.1. Description générale des peuplements

Sur les 237 lacs pêchés, 47 espèces de poissons ont été identifiées, (LN : 33, A : 27, R : 43) (Tableau 6). Un total de 20 espèces est commun entre les trois types de milieu.

La lote de rivière (*Lota lota*), la blennie (*Salaria fluviatilis*) et le spirilin (*Alburnoides bipunctatus*) sont observés uniquement dans les lacs naturels. Ces deux dernières espèces ne sont observées que sur un seul lac naturel (respectivement lac d'Annecy (74) et lac du Bouchet (43)). De même, l'Ide mélanote (*Leuciscus idus*), le mulot doré (*Liza aurata*), l'ombre commun (*Thymallus thymallus*), le sterlet (*Acipenser ruthenus*) et le toxostome (*Parachondrostoma toxostoma*) ne sont rencontrés que sur une retenue (respectivement lac du Val Joly (59), retenue d'Arzal (35), lac de Charmines Moux (01), retenue des Fades Besserves(63) et lac de Serre-Ponçon(04)). Le marais de l'Audomarois (62) est le seul lac artificiel où est observée l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*).

Le gardon (*Rutilus rutilus*) et la perche (*Perca fluviatilis*) sont rencontrés sur plus de 70% des lacs quel que soit le type et présentent les abondances les plus fortes. Le rotengle (*Scardinius erythrophthalmus*) est caractérisé par des fortes occurrences sur les trois types de lacs, mais avec des abondances plus faibles. La brème commune (*Abramis brama*) et le sandre (*Sander lucioperca*) sont très fréquemment rencontrés sur les lacs artificiels et les retenues comparés aux lacs naturels.

Il est à noter que des espèces tolérantes sont rencontrées préférentiellement dans les lacs artificiels et les retenues, tel est le cas pour la brème commune et bordelière (*Blicca bjoerkna*), l'ablette (*Alburnus alburnus*), la grémille (*Gymnocephalus cernuus*), le sandre et le silure (*Silurus glanis*). A l'inverse, le chabot (*Cottus gobio*), le goujon (*Gobio gobio*), la vandoise (*Leuciscus leuciscus*), la truite, l'omble chevalier (*Salvelinus umbla*), le cristivomer (*Salvelinus namaycush*) et le blageon (*Telestes souffia*), espèces plutôt sensibles, sont pêchés principalement dans les lacs naturels.

**Tableau 6. Occurrence et abondance moyenne des espèces capturées sur les 237 lacs pêchés (LN : 51, A : 25, R : 161, en vert les valeurs d'occurrence < 5%, en gras celles > 70%)**

Nom Latin	Code	Occurrence (%)			Abondance moyenne exprimée en CPUE*1000 (écart type *1000)					
		LN	A	R	LN		A		R	
<i>Abramis brama</i>	BRE	43.14	<b>80.00</b>	<b>80.75</b>	5.79	(17.26)	14.16	(35.83)	11.99	(30.97)
<i>Acipenser ruthenus</i>	STL	-	-	0.62	-	-	-	-	<0.01	(0.00)
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	SPI	1.96	-	-	<0.01	(0.00)	-	-	-	-
<i>Alburnus alburnus</i>	ABL	17.65	48.00	48.45	0.86	(3.92)	1.29	(3.91)	1.06	(2.48)
<i>Ameiurus melas</i>	PCH	19.61	28.00	26.09	1.01	(3.17)	4.98	(14.36)	6.22	(16.26)
<i>Anguilla anguilla</i>	ANG	1.96	4.00	1.24	<0.01	(0.02)	0.02	(0.09)	<0.01	(0.01)
<i>Barbatula barbatula</i>	LOF	3.92	-	4.97	0.01	(0.08)	-	-	0.03	(0.24)
<i>Barbus barbatus</i>	BAF	-	4.00	4.35	-	-	0.00	(0.02)	0.01	(0.03)
<i>Blicca bjoerkna</i>	BRB	27.45	56.00	59.01	3.51	(17.71)	16.24	(33.79)	8.79	(28.45)
<i>Carassius auratus</i>	CAA	-	8.00	3.73	-	-	0.03	(0.10)	<0.01	(0.03)
<i>Carassius carassius</i>	CAS	7.84	8.00	9.32	0.09	(0.58)	0.01	(0.05)	0.11	(0.75)
<i>Chondrostoma nasus</i>	HOT	-	8.00	0.62	-	-	0.01	(0.03)	<0.01	(0.00)
<i>Cobitis taenia</i>	LOR	-	12.00	0.62	-	-	0.05	(0.16)	<0.01	(0.01)
<i>Cottus gobio</i>	CHA	7.84	-	1.86	0.01	(0.05)	-	-	<0.01	(0.02)
<i>Cyprinus carpio</i>	CCO	13.73	20.00	40.37	0.02	(0.06)	0.08	(0.25)	0.28	(1.50)
<i>Esox lucius</i>	BRO	64.71	64.00	62.73	0.11	(0.17)	0.50	(0.70)	0.15	(0.28)
<i>Gambusia affinis</i>	GAM	-	-	1.86	-	-	-	-	<0.01	(0.03)
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	EPI	-	4.00	-	-	-	0.01	(0.05)	-	-
<i>Gobio gobio</i>	GOU	29.41	8.00	13.66	0.64	(3.85)	0.06	(0.23)	0.50	(3.25)
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	GRE	33.33	<b>72.00</b>	58.39	1.97	(4.63)	4.56	(8.24)	4.81	(11.52)
<i>Hypophthalmichthys</i>	CAR	-	4.00	4.35	-	-	<0.01	(0.02)	0.03	(0.28)
<i>Lepomis gibbosus</i>	PES	33.33	60.00	31.68	0.26	(0.86)	1.68	(2.56)	0.22	(1.11)
<i>Leucaspis delinatus</i>	ABH	1.96	4.00	4.97	1.08	(7.70)	<0.01	(0.02)	1.03	(12.34)
<i>Leuciscus idus</i>	IDE	-	-	0.62	-	-	-	-	<0.01	(0.03)
<i>Leuciscus leuciscus</i>	VAN	9.80	-	3.73	0.01	(0.05)	-	-	<0.01	(0.03)
<i>Liza aurata</i>	MUD	-	-	0.62	-	-	-	-	<0.01	(0.00)
<i>Liza ramada</i>	MUP	1.96	-	0.62	0.06	(0.45)	-	-	0.01	(0.12)
<i>Lota lota</i>	LOT	5.88	-	-	<0.01	(0.01)	-	-	-	-
<i>Micropterus salmoides</i>	BBG	-	-	1.86	-	-	-	-	0.00	(0.01)
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	TAC	11.76	4.00	10.56	0.03	(0.10)	0.06	(0.31)	0.04	(0.16)
<i>Parachondrostoma</i>	TOX	-	-	0.62	-	-	-	-	0.00	(0.03)
<i>Perca fluviatilis</i>	PER	<b>86.27</b>	<b>92.00</b>	<b>92.55</b>	18.68	(27.99)	19.13	(22.53)	26.12	(40.55)
<i>Phoxinus phoxinus</i>	VAI	9.80	-	4.35	1.14	(4.42)	-	-	0.09	(0.85)
<i>Pseudorasbora parva</i>	PSR	1.96	-	0.62	<0.01	(0.02)	-	-	0.12	(1.53)
<i>Rbodeus amarus</i>	BOU	-	8.00	2.48	-	-	<0.01	(0.01)	0.05	(0.38)
<i>Rutilus rutilus</i>	GAR	<b>90.20</b>	<b>100.00</b>	<b>92.55</b>	29.49	(58.48)	30.39	(43.31)	27.81	(35.37)
<i>Salaria fluviatilis</i>	BLE	1.96	-	-	<0.01	(0.00)	-	-	-	-
<i>Salmo trutta fario</i>	TRF	29.41	-	14.91	0.29	(1.02)	-	-	0.10	(0.51)
<i>Salvelinus namaycush</i>	CRI	5.88	-	0.62	0.04	(0.22)	-	-	<0.01	(0.03)
<i>Salvelinus umbla</i>	OBL	21.57	-	2.48	0.21	(0.71)	-	-	<0.01	(0.01)
<i>Sander lucioperca</i>	SAN	35.29	<b>88.00</b>	<b>78.26</b>	7.36	(35.30)	5.98	(12.61)	5.96	(12.36)
<i>Scardinius</i>	ROT	<b>76.47</b>	<b>76.00</b>	<b>74.53</b>	3.63	(11.93)	3.15	(4.85)	2.18	(5.21)
<i>Silurus glanis</i>	SIL	7.84	28.00	21.12	0.01	(0.04)	0.06	(0.12)	0.02	(0.07)
<i>Squalius cephalus</i>	CHE	45.10	12.00	25.47	0.05	(0.11)	0.01	(0.03)	0.08	(0.35)
<i>Telestes souffia</i>	BLN	3.92	-	0.62	0.16	(0.81)	-	-	0.01	(0.12)
<i>Thymallus thymallus</i>	OBR	-	-	0.62	-	-	-	-	<0.01	(0.01)
<i>Tinca tinca</i>	TAN	50.98	52.00	29.19	0.28	(0.92)	0.25	(0.32)	0.12	(0.38)

Occurrence : nombre de lacs où est présente une espèce/nombre total de lacs (%)

Abondance moyenne : moyenne des effectifs par unité d'effort de pêche avec son écart-type



## 2.1.2. Comparaisons des valeurs prises par les métriques dans les différentes zones de pêche

### *Lacs naturels*

Les valeurs des métriques des lacs naturels calculées sur la zone littorale et sur l'ensemble du lac sont comparables excepté pour 5 d'entre elles : la richesse spécifique en piscivores, les CPUE et BPUE globales, le nombre et la biomasse de cyprinidés (Tableau 7, Tableau 8). A l'inverse, la richesse en espèces piscivores est significativement inférieure en zone littorale comparée à l'ensemble du lac.

La zone littorale est caractérisée par des valeurs plus élevées par rapport aux zones benthique et pélagique pour 15 métriques (effectifs et biomasse de tolérants, de phytophiles, d'omnivores, de cyprinidés, de gardons, de rotengles, effectifs de phytolithophiles, abondance et biomasse globale) (Tableau 8). Aucune différence n'est observée entre les zones pour les 6 mesures relatives aux métriques d'intolérance et de planctivorie. Toutes les métriques relatives à la richesse spécifique ont des valeurs équivalentes entre la zone littorale et benthique, mais supérieures à la zone pélagique sauf celles d'intolérance et de planctivorie.

Quatorze espèces sont caractérisées par des valeurs d'effectifs et de biomasses par unité d'effort comparables entre les zones, ces espèces présentent des occurrences faibles (Tableau 6). Cependant, bien que non statistiquement significatif, les effectifs et les biomasses moyennes par espèce sont plus importants en zone littorale qu'en zone benthique et pélagique, excepté pour le cristivomer et l'omble chevalier. Les rotengles et les gardons ont été majoritairement pêchés en zone littorale.

Il ressort que plus de 45 % des métriques sont définies par des valeurs supérieures dans la zone littorale comparée à la zone pélagique et/ou benthique (Figure 4). De plus, 50 % des métriques ne présentent pas de différences significatives entre les 3 zones.

### *Lacs artificiels*

Plus de 90 % des métriques sont caractérisées par des valeurs similaires entre la zone littorale, les autres zones (benthique et pélagique) et la totalité du lac (Figure 4, Tableau 8). Seules 2 métriques présentent des valeurs significativement plus élevées dans la zone littorale comparées à celles observées en zones benthique et pélagique : la biomasse en phytophiles et la biomasse totale.

**Aucune différence significative entre les captures des différentes espèces n'est observée entre les compartiments lacustres (Tableau 7, Tableau 8).**

### *Retenues*

**Dans leur grande majorité, les métriques ont des valeurs supérieures ou comparables dans la zone littorale et dans l'ensemble du lac (Figure 4, Tableau 7, Tableau 8).** Seules 3 métriques ont des valeurs inférieures dans la zone littorale comparées à la totalité du lac : la richesse spécifique en phytophiles, en piscivores et globale.

Les effectifs et les biomasses de gardons, perches et rotengles sont significativement plus élevés en zone littorale au regard des zones benthique ou pélagique (Tableau 8). Les effectifs et les biomasses moyennes de la plupart des espèces sont plus importants en zone littorale qu'en zones benthique et pélagique bien que les différences ne soient pas significatives.

Près de 63 % des métriques étudiées sont caractérisés par des valeurs supérieures dans la zone littorale comparée à la zone pélagique et/ou benthique (Figure 4).

*Comparaisons entre les trois types de lacs*

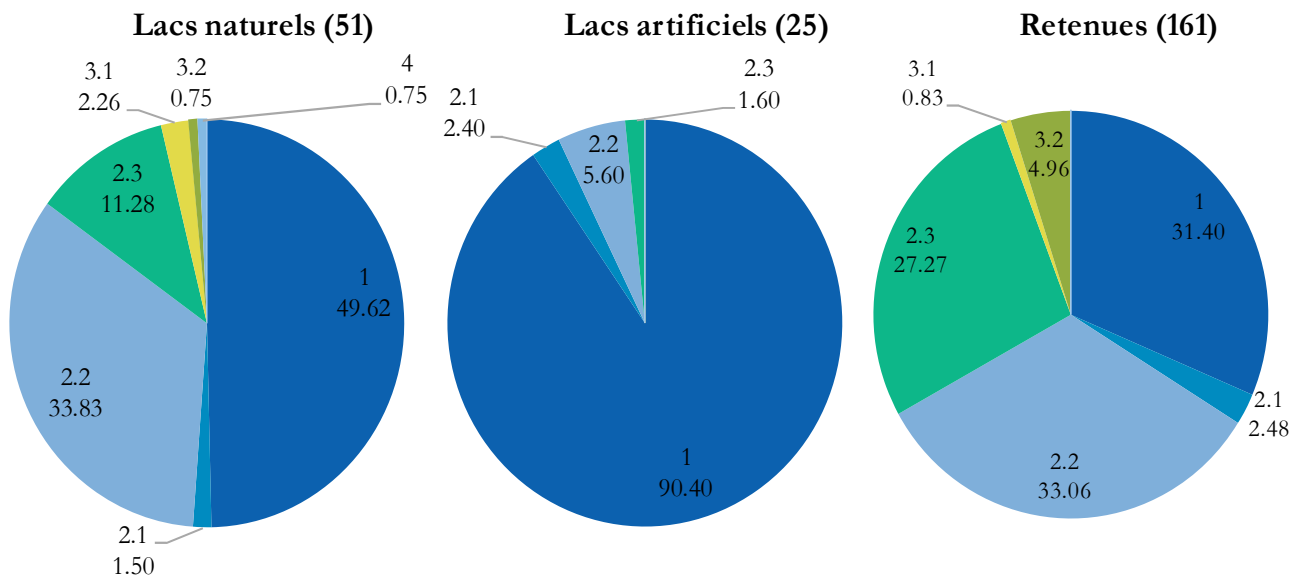
Sur l'ensemble des métriques calculées, 17 ont des valeurs comparables entre les zones et entre les types de lacs, notamment les mesures de proportions (

Tableau 7). Le silure est la seule espèce à présenter des effectifs et des biomasses similaires entre les zones et les lacs. Le nombre d'espèces tolérantes est l'unique métrique dont les résultats des tests de comparaisons sont semblables dans tous les milieux (Tableau 8).

Les résultats des tests de comparaisons sont identiques entre les lacs naturels et les retenues, en particulier pour les métriques de reproduction et les captures globales (CPUE et BPUE) (Tableau 8). De la même manière, les lacs naturels et les lacs artificiels partagent des résultats de tests de comparaisons analogues, notamment pour des métriques de trophie. En revanche, les retenues et les lacs artificiels n'ont en commun que 4 résultats de tests relatifs aux effectifs et biomasses de chevesnes (*Squalius cephalus*) et de goujons, qui sont capturés indifféremment entre les zones.

Les tests de comparaisons sur les métriques par espèces montrent que les lacs naturels partagent des résultats similaires tant avec les lacs artificiels (i.e. ablette et brème bordelière) qu'avec les retenues (i.e. sandre et perche soleil (*Lepomis gibbosus*)).

Aucun des trois types de milieux ne présente des résultats de tests identiques pour les captures (effectif et biomasse) de perches : sur les lacs naturels les captures ne sont significativement différentes qu'entre la zone littorale et pélagique tandis que sur les retenues les captures en zone littorale sont largement supérieures à tous les autres compartiments, et aucune différence n'est observée sur les lacs artificiels.



- 1 : aucune différence significative des valeurs de métriques n'est observée entre la zone littorale et les deux autres zones ;
- 2.1 : la zone littorale présente des valeurs de métriques supérieures à la zone benthique, mais similaires à la zone pélagique ;
- 2.2 : la zone littorale présente des valeurs de métriques supérieures à la zone pélagique, mais similaires à la zone benthique ;
- 2.3 : la zone littorale présente des valeurs de métriques supérieures aux deux autres zones ;
- 3.1 : la zone littorale a des valeurs de métriques inférieures à la zone benthique, mais similaires à la zone pélagique ;
- 3.2 : la zone littorale a des valeurs de métriques inférieures à la zone pélagique, mais similaires à la zone benthique ;
- 3.3 : la zone littorale a des valeurs de métriques inférieures aux deux autres zones ;
- 4 : la zone littorale a des valeurs de métriques inférieures à la zone benthique mais supérieures à la zone pélagique ;
- 5 : la zone littorale a des valeurs de métriques supérieures à la zone benthique mais inférieures à la zone pélagique ;

**Figure 4. Répartition des métriques suite à la comparaison entre les zones (littorale, benthique et pélagique) entre les trois types de lacs**

**Tableau 7. Valeur moyenne des métriques par zone pour les métriques ne présentant aucune différence significative entre les zones et les types de lacs (\* : valeur multipliée par 1000). Les valeurs moyennes peuvent être fortement différentes sans que les tests ne montrent de différences significatives car ils se basent sur les médianes qui sont moins sensibles aux outliers.**

Métriques	LN (51)				A (25)				R (161)			
	ZA	ZL	ZB	ZP	ZA	ZL	ZB	ZP	ZA	ZL	ZB	ZP
Sp_OTol_P100	46.87	48.82	47.47	59.19	60.59	62.58	62.22	60.37	57.07	58.91	59.95	60.74
B_OTol_P100	60.48	53.33	63.10	57.74	71.80	68.13	76.60	79.26	74.25	73.64	74.32	69.50
Sp_OIntol	0.65	0.34	0.61	0.29	0.08	0.04	0.00	0.17	0.15	0.08	0.11	0.15
Sp_OIntol_P100	12.01	9.22	13.29	14.52	0.62	0.31	0.00	1.85	3.00	2.54	2.82	4.02
Nb_OIntol *	0.55	1.01	1.10	0.07	<0.01	0.01	0.00	0.01	0.10	0.20	0.17	0.02
Nb_OIntol_P100	6.49	4.79	9.39	16.99	<0.01	<0.02	0.00	0.03	0.96	0.75	1.26	1.81
B_OIntol *	94.98	150.36	231.66	14.71	<0.01	0.01	0.00	0.02	24.49	45.22	38.57	10.21
B_OIntol_P100	13.10	10.14	16.50	16.87	<0.01	<0.02	0.00	<0.01	2.06	1.60	2.23	4.35
Nb_Phytlith_P100	77.43	73.93	78.53	71.49	73.56	67.56	80.14	86.40	81.44	81.32	80.42	83.45
B_Phytlith_P100	56.75	50.09	61.53	60.20	66.75	59.22	73.89	76.16	70.10	69.11	71.34	70.95
Sp_Lith_P100	23.60	20.23	23.75	19.86	9.50	10.18	11.41	6.11	11.27	10.19	11.05	10.67
Nb_Lith_P100	13.93	14.10	15.23	19.36	8.70	10.41	9.52	4.28	8.28	7.54	10.36	7.28
B_Lith_P100	16.90	15.50	18.24	22.05	4.57	4.39	5.49	5.35	8.30	7.06	9.84	11.00
Nb_Omni_P100	44.61	49.13	37.38	58.35	51.25	54.40	41.91	51.21	51.39	52.27	49.44	52.25
B_Omni_P100	48.97	58.46	40.59	59.71	49.54	55.65	42.22	52.80	50.53	54.05	46.44	52.53
Sp_Plankt	0.61	0.50	0.43	0.20	1.28	1.04	1.06	0.83	1.29	1.20	1.11	0.94
Sp_Plankt_P100	6.52	5.91	6.76	5.67	13.97	12.26	12.53	13.15	14.05	14.47	14.75	17.10
Nb_Plankt_P100	5.47	5.68	3.97	2.64	9.50	8.97	7.87	10.09	11.58	10.62	12.08	15.72
B_Plankt_P100	9.54	8.98	8.78	3.18	14.89	14.11	13.18	6.02	17.12	15.50	18.50	13.26
Sp_Cypr_P100	52.61	56.84	49.93	60.00	52.54	51.95	49.79	56.67	53.52	53.88	50.49	57.58
Sp_Perc_P100	18.38	19.93	22.28	20.48	28.03	27.82	29.66	27.04	25.96	28.25	31.03	26.88
Nb_Cypr_Perc	2.85	3.68	1.26	12.09	4.92	5.49	2.02	4.79	7.21	6.85	5.84	11.53
B_Cypr_Perc	4.83	10.69	12.23	41.02	4.22	5.30	2.60	77.50	9.45	10.41	6.17	15.13
Nb_G_P	7.59	7.97	0.90	10.79	7.00	6.06	9.38	2.62	8.46	8.15	5.60	8.55
B_G_P	6.37	8.43	1.62	19.60	4.50	4.04	5.06	95.05	7.57	7.44	9.82	24.07
Nb_BOU *					0.00	0.01	0.00	0.01				
Nb_CAA *					0.03	0.04	0.04	0.00				
Nb_CHA *	0.01	0.01	0.02	0.00								
Nb_CRI *	0.04	0.03	0.16	0.01								
Nb_HOT *					0.01	<0.01	0.01	0.00				
Nb_LOR *					0.05	0.08	0.01	0.00				
Nb_LOT *	<0.01	0.00	<0.01	0.00								
Nb_OBL *	0.21	0.19	0.44	0.04								
Nb_SIL *	0.01	0.02	0.01	0.00	0.06	0.07	0.04	0.00	0.02	0.05	0.03	0.01
Nb_TAC *	0.03	0.17	0.03	0.01					0.04	0.08	0.04	0.05
Nb_TRF *	0.29	0.79	0.48	0.02					0.10	0.20	0.17	0.02
Nb_VAI *	1.14	8.30	0.80	0.00								
Nb_VAN *	0.01	0.08	0.01	0.00								
B_BOU *					<0.01	0.01	0.00	0.02				
B_CAA *					21.85	30.79	26.96	0.00				
B_CHA *	0.03	0.03	0.09	0.00								
B_CRI *	23.65	2.90	90.59	5.79								
B_HOT *					10.32	1.95	20.75	0.00				
B_LOR *					0.19	0.35	0.03	0.00				
B_LOT *	0.25	0.00	0.76	0.00								
B_OBL *	19.22	9.80	42.11	5.15								
B_SIL *	15.79	27.22	7.20	0.00	36.29	43.12	35.69	0.00	36.04	88.56	20.25	6.93
B_TAC *	11.64	48.47	9.77	11.13					15.40	33.57	16.01	16.43
B_TRF *	52.08	137.63	98.87	3.78					24.49	45.22	38.57	10.21
B_VAI *	2.89	17.69	2.34	0.02								
B_VAN *	1.71	9.95	0.94	0.18								

ZA : totalité du lac, ZL: zone littorale, ZB: zone benthique, ZP: zone pélagique

**Tableau 8. Synthèse de la comparaison des valeurs prises par les métriques entre les zones pour les métriques présentant au moins une différence significative entre les zones et/ou entre les types de lacs (= : pas de différence, < > valeurs inférieures ou supérieures par rapport à la zone littorale)**

Métriques	LN (51)			A (25)			R (161)		
	ZL vs ZA	ZL vs ZB	ZL vs ZP	ZL vs ZA	ZL vs ZB	ZL vs ZP	ZL vs ZA	ZL vs ZB	ZL vs ZP
Sp_OTol	=	=	>	=	=	>	=	=	>
Nb_OTol	=	>	>	=	=	=	>	>	>
Nb_OTol_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	<
B_OTol	=	>	>	=	=	=	>	>	>
Sp_Phytlith	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Sp_Phytlith_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	<
Nb_Phytlith	=	>	>	=	=	=	>	>	>
B_Phytlith	=	=	>	=	=	=	>	>	>
Sp_Lith	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_Lith	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_Lith	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Sp_Phyt	=	=	>	=	=	=	<	>	>
Sp_Phyt_P100	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Nb_Phyt	=	>	>	=	=	=	>	>	>
Nb_Phyt_P100	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_Phyt	=	>	>	=	>	>	>	>	>
B_Phyt_P100	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Sp_Omni	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Sp_Omni_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_Omni	=	>	>	=	=	=	>	>	>
B_Omni	=	>	>	=	>	=	>	>	>
Sp_Invert	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Sp_Invert_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	<
Nb_Invert	=	=	>	=	=	>	>	>	>
Nb_Invert_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_Invert	=	=	>	=	=	>	>	>	>
B_Invert_P100	=	<	=	=	=	=	=	=	=
Nb_Plankt	=	=	=	=	=	=	=	>	>
B_Plankt	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Sp_Pisc	<	=	>	=	=	=	<	=	>
Sp_Pisc_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	<
Nb_Pisc	=	=	>	=	=	>	>	>	>
Nb_Pisc_P100	=	<	=	=	=	=	=	=	=
B_Pisc	=	=	>	=	=	>	>	>	>
B_Pisc_P100	=	<	=	=	=	=	=	=	=
Sp_Exo	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Sp_Exo_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_Exo	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Nb_Exo_P100	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_Exo	=	=	>	=	=	=	=	>	>
B_Exo_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	>
CPUE	>	>	>	=	=	=	>	>	>
BPUE	>	>	>	=	>	>	>	>	>
AB	=	=	=	=	=	=	=	<	=
RS	=	=	>	=	=	=	<	=	>
SWI	=	=	>	=	=	=	=	=	>
SI	=	=	<	=	=	=	=	=	<
Sp_Cypr	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Nb_Cypr	>	>	>	=	>	=	>	>	>
Nb_Cypr_P100	=	>	=	=	=	=	=	=	<
B_Cypr	>	>	>	=	>	=	>	>	>
B_Cypr_P100	=	>	=	=	=	=	=	>	=
Sp_Perc	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_Perc	=	=	>	=	=	>	>	>	>
Nb_Perc_P100	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_Perc	=	=	>	=	=	>	>	>	>
B_Perc_P100	=	<	>	=	=	=	=	=	>

Sp_Cypr_Perc	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Nb_ABL	=	=	=	=	=	=	=	>	=
Nb_BRB	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_BRE	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_BRO	=	=	>	=	=	=	=	>	>
Nb_CAS	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_CCO	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_CHE	=	=	>	=	=	=	=	=	=
Nb_GAR	=	>	>	=	=	=	>	>	>
Nb_GOU	=	=	>	=	=	=	=	=	=
Nb_GRE	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_PCH	=	=	=	=	=	=	=	=	>
Nb_PER	=	=	>	=	=	=	>	>	>
Nb_PES	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_ROT	=	>	>	=	=	=	=	>	>
Nb_SAN	=	=	>	=	=	=	=	=	>
Nb_TAN	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_ABL	=	=	=	=	=	=	=	>	=
B_BRB	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_BRE	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_BRO	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_CAS	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_CCO	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_CHE	=	=	>	=	=	=	=	=	=
B_GAR	=	>	>	=	=	=	>	>	>
B_GOU	=	=	>	=	=	=	=	=	=
B_GRE	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_PCH	=	=	=	=	=	=	=	=	>
B_PER	=	=	>	=	=	=	>	>	>
B_PES	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_ROT	=	>	>	=	=	=	=	>	>
B_SAN	=	=	>	=	=	=	=	=	>
B_TAN	=	=	>	=	=	=	=	=	>

ZA : totalité du lac, ZL: zone littorale, ZB: zone benthique, ZP: zone pélagique

### 2.1.3. Comparaisons des valeurs prises par les métriques en zone littorale dans les différents milieux

Les retenues et les lacs artificiels sont caractérisés par des valeurs de captures globales et de richesses spécifiques en zone littorale plus élevées au regard de celles observées sur les lacs naturels (Tableau 9). Cependant, les différences ne sont significatives qu'avec les retenues. Les lacs artificiels présentent des valeurs de richesse spécifique équivalente entre les deux autres milieux.

Sur les lacs naturels, les valeurs des métriques de tolérance sont significativement inférieures à celles mesurées sur lacs artificiels et/ou les retenues (Tableau 9). A l'inverse, les captures d'intolérants sont plus fréquentes sur les lacs naturels.

La zone littorale des retenues concentre plus de phytolithophiles en termes de richesse spécifique, de nombre d'individus et de biomasse que les lacs naturels, voire que les lacs artificiels (Tableau 9). En ce qui concerne les lithophiles, il n'existe aucune différence entre les milieux. La proportion de phytophiles (en nombre d'individus et en biomasse) est plus importante dans les zones littorales des retenues que dans celles des lacs artificiels.

Les retenues sont caractérisées par des captures d'omnivores supérieures à celles observées sur les lacs naturels (Tableau 9). Les valeurs des métriques de planctivorie sont significativement inférieures sur les lacs naturels par rapport aux retenues et/ou aux lacs artificiels. Aucune différence statistiquement significative n'est observée pour le caractère invertivore et piscivore, excepté pour les mesures de biomasses, plus faibles sur les lacs naturels que sur les retenues.

Toutes les métriques relatives au caractère exotique sont significativement plus faibles sur les zones littorales des lacs naturels que dans les mêmes zones des autres milieux (Tableau 9).

Les captures de cyprinidés et de percidés sont moins importantes sur les lacs naturels par rapport à au moins un des deux autres types (Tableau 9). Il n'existe aucune dissimilitude entre les milieux pour les captures de 8 espèces : brochet (*Esox lucius*), carassin (*Carassius carassius*), goujon, grémille, poisson chat (*Ameiurus melas*), rotengle, silure et truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Les captures (nombre d'individus et biomasse) de brèmes bordelières et de sandres sont significativement plus élevées dans les lacs artificiels et les retenues que dans les lacs naturels. De la même manière, les ablettes, les brèmes communes et les gardons sont capturés majoritairement dans les zones littorales des retenues que dans celles des lacs naturels. Seuls les nombres d'individus pêchés en zone littorale de carpes communes (*Cyprinus carpio*) et de perches présentent des valeurs plus élevées sur les retenues. Deux espèces sont capturées principalement sur les lacs naturels : le chevesne et la tanche (*Tinca tinca*), de même que la truite fario, mais de manière non significative. Les captures de perches soleil en zone littorale des lacs artificiels sont largement supérieures à celles des deux autres types de milieux.

**Tableau 9. Synthèse des tests de comparaison sur les métriques calculées en zone littorale entre les types de lacs et leur valeur moyenne** (\* : valeur multipliée par 1000, = : pas de différence, < > valeurs inférieures ou supérieures, LN : lacs naturels, A : lacs artificiels, R : retenues)

Métriques	Résultats des tests de comparaison entre les milieux			Valeur moyenne des métriques calculées en zone littorale		
	LN vs R	LN vs A	R vs A	LN	A	R
Sp_OTol	<	<	=	3.58	5.08	4.74
Sp_OTol_P100	<	<	=	48.82	62.58	58.91
Nb_OTol	*	<	=	92.80	102.01	158.88
Nb_OTol_P100	<	=	=	70.78	82.14	81.88
B_OTol	*	<	=	3087.44	4090.35	5595.91
B_OTol_P100	<	=	=	53.33	68.13	73.64
Sp_OIntol	>	>	=	0.34	0.04	0.08
Sp_OIntol_P100	>	=	=	9.22	0.31	2.54
Nb_OIntol	*	>	=	1.01	0.01	0.20
Nb_OIntol_P100	>	=	=	4.79	<0.01	0.75
B_OIntol	*	>	=	150.36	0.01	45.22
B_OIntol_P100	>	=	=	10.14	<0.01	1.60
Sp_Phytlith	<	=	=	3.52	4.44	4.67
Sp_PhytLith_P100	<	=	=	48.20	53.78	58.81
Nb_PhytLith	*	<	=	95.85	82.73	155.69
Nb_PhytLith_P100	<	=	>	73.93	67.56	81.32
B_PhytLith	*	<	=	2492.58	3427.50	5137.17
B_PhytLith_P100	<	=	=	50.09	59.22	69.11
Sp_Lith	=	=	=	1.06	0.88	0.66
Sp_Lith_P100	=	=	=	20.23	10.18	10.19
Nb_Lith	*	=	=	11.40	10.07	9.18
Nb_Lith_P100	=	=	=	14.10	10.41	7.54
B_Lith	=	=	=	315.85	284.10	417.36
B_Lith_P100	=	=	=	15.50	4.39	7.06
Sp_Phyt	=	=	=	2.18	2.92	2.48
Sp_Phyt_P100	=	=	=	31.57	35.73	31.00
Nb_Phyt	*	=	<	14.48	26.71	19.78
Nb_Phyt_P100	=	<	<	11.97	22.02	11.13
B_Phyt	*	=	=	2099.58	1995.83	1806.05
B_Phyt_P100	=	=	<	34.42	36.39	23.83
Sp_Omni	=	=	=	3.52	4.00	3.78
Sp_Omni_P100	=	=	=	50.66	48.79	47.50
Nb_Omni	*	<	=	63.41	70.79	91.32
Nb_Omni_P100	=	=	=	49.13	54.40	52.27
B_Omni	*	<	=	3215.91	3209.10	4024.42
B_Omni_P100	=	=	=	58.46	55.65	54.05
Sp_Invert	=	=	=	2.18	2.32	2.20

Sp_Invert_P100		=	=	=	36.16	28.10	30.35
Nb_Invert	*	=	=	=	49.98	31.89	73.35
Nb_Invert_P100		=	=	=	44.73	35.09	36.76
B_Invert	*	<	=	=	1032.22	1238.10	1772.95
B_Invert_P100		=	=	=	29.37	23.21	27.02
Sp_Plankt		<	<	=	0.50	1.04	1.20
Sp_Plankt_P100		<	<	=	5.91	12.26	14.47
Nb_Plankt	*	<	=	=	8.07	15.83	19.61
Nb_Plankt_P100		<	=	=	5.68	8.97	10.62
B_Plankt	*	<	=	=	501.29	961.50	1324.02
B_Plankt_P100		<	=	=	8.98	14.11	15.50
Sp_Pisc		<	=	=	2.08	2.48	2.44
Sp_Pisc_P100		=	=	=	33.41	30.48	33.11
Nb_Pisc	*	=	=	=	40.32	29.45	71.61
Nb_Pisc_P100		=	=	=	35.91	31.28	34.24
B_Pisc	*	<	=	=	1154.36	1508.56	1987.49
B_Pisc_P100		=	=	=	30.42	29.58	29.59
Sp_Exo		<	<	=	1.06	1.76	1.63
Sp_Exo_P100		<	=	=	13.31	21.33	20.80
Nb_Exo	*	<	<	=	8.37	24.31	26.01
Nb_Exo_P100		<	<	=	5.84	18.66	15.16
B_Exo	*	<	<	=	728.15	1565.63	2022.45
B_Exo_P100		<	<	=	14.08	23.03	24.89
CPUE		<	=	>	0.12	0.12	0.18
BPUE		<	=	=	4.91	5.71	7.36
AB		=	=	=	63.76	63.54	61.20
RS		<	=	=	6.76	8.28	7.82
SWI		<	<	=	2.38	3.04	2.75
SI		>	>	=	0.47	0.35	0.41
Sp_Cypr		=	=	=	3.84	4.28	4.29
Sp_Cypr_P100		=	=	=	56.84	51.95	53.88
Nb_Cypr	*	<	=	=	76.20	75.61	96.60
Nb_Cypr_P100		=	=	=	59.84	54.40	56.33
B_Cypr	*	<	=	=	3642.64	3883.76	4981.06
B_Cypr_P100		=	=	=	67.23	65.53	65.76
Sp_Perc		<	<	=	1.48	2.28	2.23
Sp_Perc_P100		<	<	=	19.93	27.82	28.25
Nb_Perc	*	<	=	=	42.24	32.83	78.51
Nb_Perc_P100		=	=	=	32.85	33.66	35.78
B_Perc	*	<	<	=	818.56	1244.74	1722.98
B_Perc_P100		<	<	=	15.79	23.22	23.74
Sp_Cypr_Perc		=	=	=	2.41	2.04	2.05
Nb_Cypr_Perc		=	=	=	3.68	5.49	6.85
B_Cypr_Perc		=	=	=	10.69	5.30	10.41
Nb_G_P		=	=	=	7.97	6.06	8.15
B_G_P		=	=	=	8.43	4.04	7.44
Nb_ABL	*	<	=	=	1.76	1.73	2.95
Nb_BRB	*	<	<	=	6.65	19.92	12.22
Nb_BRE	*	<	=	=	6.31	14.09	16.66
Nb_BRO	*	=	=	=	0.26	0.87	0.31
Nb_CAS	*	=	=	=	0.11	0.01	0.12
Nb_CCO	*	<	=	=	0.03	0.12	0.37
Nb_CHE	*	=	=	>	0.33	0.01	0.34
Nb_GAR	*	<	=	>	43.97	33.91	55.73
Nb_GOU	*	=	=	=	1.24	0.16	1.50
Nb_GRE	*	=	=	=	3.37	4.32	7.53
Nb_PCH	*	=	=	=	1.44	6.84	8.31
Nb_PER	*	=	=	=	31.50	21.57	61.61
Nb_PES	*	=	<	<	0.40	3.22	0.60
Nb_ROT	*	=	=	=	6.78	5.05	6.38
Nb_SAN	*	>	>	=	7.37	6.94	9.37
Nb_SIL	*	=	=	=	0.02	0.07	0.05
Nb_TAC	*	=	NA	NA	0.17	-	0.08



Nb_TAN	*	>	=	=	0.64	0.55	0.32
Nb_TRF	*	=	NA	NA	0.79	-	0.20
B_ABL	*	<	=	=	16.84	29.27	52.15
B_BRB	*	<	<	=	393.70	461.05	468.46
B_BRE	*	<	=	=	484.45	932.24	1271.87
B_BRO	*	=	=	=	131.37	253.33	150.63
B_CAS	*	=	=	=	22.26	13.58	39.91
B_CCO	*	=	=	=	102.95	320.45	378.44
B_CHE	*	>	>	=	186.29	2.92	105.62
B_GAR	*	<	=	=	974.78	1216.94	1967.02
B_GOU	*	=	=	=	11.65	1.39	17.53
B_GRE	*	=	=	=	21.60	32.63	53.47
B_PCH	*	=	=	=	82.30	257.55	331.45
B_PER	*	<	=	=	541.58	679.85	896.23
B_PES	*	=	<	<	7.08	24.60	7.12
B_ROT	*	=	=	=	960.57	749.14	496.78
B_SAN	*	<	<	=	255.39	532.26	773.28
B_SIL	*	=	=	=	27.22	43.12	88.56
B_TAC	*	=	NA	NA	48.47	-	33.57
B_TAN	*	>	=	>	461.51	124.03	183.26
B_TRF	*	=	NA	NA	137.63	-	45.22

## 2.2. Étude des captures sur les lacs naturels et les retenues échantillonnés à l'aide du Lake Habitat Survey

### 2.2.1. Description générale des peuplements

La richesse spécifique de la zone littorale des retenues s'élève à 40 espèces contre 32 pour les lacs naturels (Tableau 10). Cependant, seulement 18 espèces pour les retenues et 22 pour les lacs naturels possèdent une occurrence supérieure à 5 % en zone littorale. Les deux types de plans d'eau partagent 29 espèces, alors que 11 ne se rencontrent que dans les retenues et 3 uniquement dans les lacs naturels (blennie, spirilin, chabot).

Le gardon et la perche sont caractérisés par des fortes occurrences (> 80 %) et des abondances élevées quel que soit le type de lac. Le rotengle a été fortement capturé à la fois sur les lacs naturels et les retenues, mais en plus faible quantité que le gardon ou la perche.

De fortes différences d'occurrences sont observées pour certaines espèces entre les deux types de lacs : les espèces tolérantes (brème commune et bordelière, ablette, carpe commune, grémille, silure) étant plutôt capturées dans les retenues et les intolérantes dans les lacs naturels (spirilin, truite fario, cristivomer, omble chevalier, blageon).

**Tableau 10. Occurrence et abondance moyenne des espèces capturées en zone littorale sur les 187 lacs échantillonnés à l'aide du Lake Habitat Survey (LN : 42, R : 145, en vert les valeurs d'occurrence < 5%, en gras celles > 70%)**

Nom Latin	Code	Occurrence (%)		Abondance moyenne exprimée en CPUE*1000 (écart type *1000)			
		LN	R	LN		R	
<i>Abramis</i>	BRE	36.00	<b>77.02</b>	6.31	(17.47)	16.66	(35.66)
<i>Alburnoides</i>	SPI	2.00	-	0.01	(0.06)	-	-
<i>Alburnus</i>	ABL	14.00	43.48	1.76	(8.23)	2.95	(7.37)
<i>Ameiurus</i>	PCH	20.00	26.09	1.44	(4.34)	8.31	(20.65)
<i>Anguilla</i>	ANG	2.00	0.62	0.00	(0.02)	<0.01	(0.02)
<i>Barbatula</i>	LOF	2.00	4.35	0.01	(0.07)	0.10	(0.68)
<i>Barbus barbuis</i>	BAF	-	1.86	-	-	0.01	(0.07)
<i>Blicca bjoerkna</i>	BRB	24.00	54.04	6.65	(36.84)	12.22	(35.63)
<i>Carassius</i>	CAA	-	3.11	-	-	0.01	(0.09)
<i>Carassius</i>	CAS	8.00	9.32	0.11	(0.59)	0.12	(0.70)
<i>Cobitis taenia</i>	LOR	-	0.62	-	-	<0.01	(0.04)
<i>Cottus gobio</i>	CHA	4.00	-	0.01	(0.04)	-	-
<i>Cyprinus carpio</i>	CCO	12.00	27.95	0.03	(0.08)	0.37	(1.59)
<i>Esox lucius</i>	BRO	50.00	49.69	0.26	(0.37)	0.31	(0.65)
<i>Gambusia</i>	GAM	-	1.24	-	-	0.01	(0.05)
<i>Gobio gobio</i>	GOU	26.00	11.80	1.24	(4.66)	1.50	(9.61)
<i>Gymnocephalus</i>	GRE	34.00	55.28	3.37	(8.24)	7.53	(16.47)
<i>Hypophthalmic</i>	CAR	-	3.73	-	-	0.09	(0.86)
<i>Lepomis</i>	PES	26.00	27.33	0.40	(1.09)	0.60	(2.93)
<i>Leucaspis</i>	ABH	2.00	3.73	1.10	(7.77)	1.03	(12.34)
<i>Leuciscus idus</i>	IDE	-	0.62	-	-	<0.01	(0.06)
<i>Leuciscus</i>	VAN	8.00	3.11	0.08	(0.30)	0.04	(0.26)
<i>Liza aurata</i>	MUD	-	0.62	-	-	<0.01	(0.01)
<i>Liza ramada</i>	MUP	2.00	0.62	0.06	(0.46)	0.01	(0.13)
<i>Micropterus</i>	BBG	-	1.24	-	-	<0.01	(0.02)
<i>Oncorhynchus</i>	TAC	8.00	4.97	0.17	(0.74)	0.08	(0.60)
<i>Parachondrostoma</i>	TOX	-	0.62	-	-	0.03	(0.38)
<i>Perca fluviatilis</i>	PER	<b>84.00</b>	<b>91.93</b>	31.50	(47.62)	61.61	(101.59)
<i>Phoxinus</i>	VAI	10.00	3.11	8.30	(44.94)	1.02	(9.02)
<i>Pseudorasbora</i>	PSR	2.00	0.62	<0.01	(0.02)	0.97	(12.31)
<i>Rhodeus</i>	BOU	-	2.48	-	-	0.09	(0.73)
<i>Rutilus rutilus</i>	GAR	<b>88.00</b>	<b>92.55</b>	43.97	(63.96)	55.73	(59.73)
<i>Salaria</i>	BLE	2.00	-	0.01	(0.07)	-	-
<i>Salmo trutta</i>	TRF	20.00	8.07	0.79	(2.51)	0.20	(1.07)
<i>Salvelinus</i>	CRI	4.00	0.62	0.03	(0.18)	<0.01	(0.04)
<i>Salvelinus</i>	OBL	6.00	0.62	0.19	(0.86)	<0.01	(0.01)
<i>Sander</i>	SAN	30.00	<b>75.78</b>	7.37	(32.35)	9.37	(19.06)
<i>Scardinius</i>	ROT	<b>72.00</b>	69.57	6.78	(13.80)	6.38	(23.80)
<i>Silurus glanis</i>	SIL	6.00	13.66	0.02	(0.07)	0.05	(0.20)
<i>Squalius</i>	CHE	40.00	19.25	0.33	(0.79)	0.34	(1.56)
<i>Telestes souffia</i>	BLN	4.00	0.62	1.11	(6.18)	0.06	(0.70)
<i>Thymallus</i>	OBR	-	0.62	-	-	<0.01	(0.02)
<i>Tinca tinca</i>	TAN	46.00	24.22	0.64	(1.71)	0.32	(1.04)

Occurrence : nombre de lacs où est présente une espèce/nombre total de lacs (%)

Abondance moyenne : moyenne des effectifs par unité d'effort de pêche avec son écart-type

### 2.2.2. Sélection des métriques piscicoles

Le critère à prendre en compte pour juger de la pertinence des métriques est une large gamme de valeurs des métriques avec peu d'outliers. Les métriques ne respectant pas cette condition ne sont donc pas étudiées par modélisation ; ainsi, un total de 89 métriques est conservé pour les lacs naturels (Annexe 7) et 90 pour les retenues (Annexe 8). Les métriques liées au caractère intolérant et un grand

nombre de celles liées aux effectifs et biomasse par espèce ne sont pas exploitables quel que soit le type de lac.

### 2.2.3. Sensibilité des métriques piscicoles à la qualité des habitats

#### *Lacs naturels*

Seules 4 métriques présentent une corrélation avec le score du Lake Habitat Quality Assessment : la biomasse et son ratio en planctivores, les effectifs et la biomasse de brème bordelière (Tableau 11). Toutes ces métriques diminuent avec la qualité des habitats. Aucun des sous-scores du LHQA n'est corrélé à une métrique piscicole.

**Tableau 11. Liste des métriques corrélées à plus de 0.5 au score du LHQA ou à au moins un des ces sous-scores pour les lacs naturels**

	LHQA
B_Plankt	-0.50665879
B_Plankt_P100	-0.50629344
Nb_BRE	-0.52907799
B_BRE	-0.51783682

#### *Retenues*

Sur les retenues, aucune métrique n'est corrélée à la qualité des habitats aussi bien au regard du score du LHQA que de ses sous-scores.

### 2.2.4. Analyses des corrélations simples entre les métriques et l'altération des habitats

#### *Lacs naturels*

Huit métriques sont corrélées significativement avec le score du LHMS ou un de ses sous-scores (Tableau 12). Les corrélations entre les métriques et les variables relatives à l'altération des habitats peuvent être d'intensité moyenne avec des coefficients proches de 0,5 en valeur absolue. La proportion d'espèces phytolithopiles est la seule métrique corrélée aux usages sur le lac (LHMS\_Lake\_Use). Le nombre d'espèces de percidés, la biomasse de poissons chat et de sandres semblent sensibles à la sédimentation, alors que la richesse spécifique en cyprinidés sur percidés et des effectifs de tanches par unité d'effort semblent augmenter avec la sédimentation. De plus, les captures et la biomasse de chevesnes sont positivement associées à une altération globale des habitats (LHMS), et plus précisément à une modification des berges (LHMS\_Shore\_Modif) et à leur occupation non naturelle du sol (LHMS\_Shore\_Use).

L'altération de l'hydrologie et la présence d'espèce végétale invasive ne montrent aucun lien avec les métriques piscicoles.

**Tableau 12. Liste des métriques corrélées à plus de 0.5 au score du LHMS ou à au moins un des ces sous-scores pour les lacs naturels** (bleu pour les corrélations positives et jaune pour les négatives)

	LHMS	LHMS Shore_Modif	LHMS Shore_Use	LHMS Lake_Use	LHMS Sediment
Sp_PhytLith_P100	0.37	0.22	0.32	0.66	-0.25
Nb_Exo	-0.22	-0.11	-0.07	0.12	-0.48
Nb_Exo_P100	-0.17	-0.09	-0.02	0.13	-0.40
B_Exo	-0.14	-0.08	0.00	0.16	-0.41
Sp_Perc	0.04	0.01	0.05	0.40	-0.51
Sp_Cypr_Perc	0.59	0.42	0.41	0.12	0.51
Nb_CHE	0.70	0.72	0.67	0.31	0.15
Nb_TAN	0.13	0.15	0.05	-0.29	0.52
B_CHE	0.71	0.73	0.67	0.31	0.15
B_PCH	-0.17	-0.22	-0.07	0.07	-0.50
B_SAN	-0.26	-0.19	-0.29	0.14	-0.54

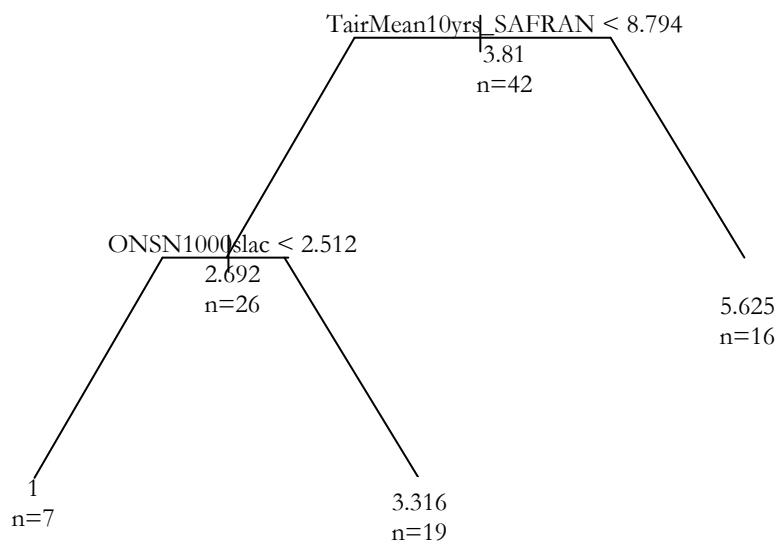
### Retenues

Pour les retenues, aucune métrique ne montre de corrélation avec les variables d'altérations des habitats.

### 2.2.5. Modélisation de la réponse des métriques à l'altération des habitats

#### Lacs naturels

Aucune variable relative à l'altération des habitats ne ressort dans les modèles. De plus, quasiment tous les arbres sont inexploitable du fait d'un taux d'erreur élevé (> 25 %). Seul le modèle de la richesse spécifique en tolérants remplit toutes les conditions d'application et a pu être validé par la méthode Leave One Out (Figure 5). Il est caractérisé par un taux d'erreur de 24 % avec une corrélation entre les valeurs observées et prédites de 0.87. Cet arbre permet de distinguer 3 groupes de lacs naturels (i) ceux avec une richesse spécifique moyenne en tolérants de 1, (ii) ceux avec une richesse spécifique moyenne de 3.32 et (iii) ceux avec une richesse spécifique moyenne de 5.62 (Figure 5). Les espèces tolérantes ont été préférentiellement capturées sur les lacs dont la température moyenne de l'air sur 10 ans est supérieure à 8.79 °C. A l'inverse, les plus faibles richesses spécifiques en tolérants ont été observées sur les lacs dont la température moyenne de l'air sur 10 ans est inférieure à 8.79 °C et le rapport entre l'occupation naturelle et semi-naturelle dans la zone rivulaire à 1000 m des berges sur la surface du lac est inférieur à 2.51.



**Figure 5. Arbre de régression élagué pour la richesse spécifique en tolérants sur les lacs naturels (n=42)**

## *Retenues*

Aucun modèle basé sur les indices du LHS n'est exploitable en ce qui concerne les retenues. En effet, les indices d'altérations des habitats ne sont pas conservés dans les modèles. De plus, aucun arbre avec un taux d'erreur inférieur à 25 % n'a été observé.

## **Discussion**

### **Comparaisons des valeurs prises par les métriques dans les différentes zones de pêche**

Il n'existe pratiquement aucune différence entre les valeurs des métriques entre les zones pour les lacs artificiels. Cela s'explique par le fait que ces lacs sont peu profonds et ne possèdent pas une morphologie lacustre bien différenciée. En effet, leur zone littorale est très développée et la zone 0-3 m ne correspond pas nécessairement à la zone littorale.

Les lacs naturels sont caractérisés par des valeurs de métriques comparables en zone littorale et sur l'ensemble du lac. De plus, près de 50% des métriques calculées en zone littorale sont similaires à celles calculées en zone benthique et pélagique.

Sur les retenues, en cas de différences de valeurs de métriques entre les trois zones (littorale, benthique et pélagique), les métriques calculées à partir des captures en zone littorale sont quasiment toujours supérieures à au moins l'une des 2 autres zones.

Quel que soit le type de milieu, les captures moyennes par espèce sont plus élevées dans la zone littorale, bien que les différences ne soient pas toutes significatives. Les captures en zone littorale apportent plus d'informations que celles calculées sur les autres zones en particulier sur les retenues et les lacs naturels. Il est donc pertinent de centrer l'étude sur cette zone pour rendre compte des pressions locales. La zone littorale joue un rôle primordial pour l'ichtyofaune (nourrissage, reproduction) (Winfield, 2004), et est directement impactée par les activités anthropiques (Bragg et al., 2003; Jennings et al., 1999; Schmieder, 2004).

### **Comparaisons des valeurs prises par les métriques en zone littorale entre les milieux**

La richesse spécifique et les captures (effectif et biomasse) globales des retenues sont significativement supérieures à celles des lacs naturels. Ces résultats sont en accord avec une étude antérieure (Decelie-Vergès et al., 2009).

Les espèces intolérantes sont capturées principalement dans les lacs naturels voire uniquement dans ce milieu. A l'inverse, les espèces tolérantes sont pêchées dans les retenues et les lacs artificiels. Cette tendance est également observée pour le caractère exotique.

Les espèces qui ne présentent pas de préférence d'habitat de reproduction sont observées majoritairement dans les retenues et les lacs artificiels plutôt que dans les lacs naturels.

Les lacs artificiels semblent être des milieux intermédiaires entre les lacs naturels et les retenues en termes de peuplements piscicoles. En effet, près de 80 % des métriques entre lacs artificiels/lacs naturels et 91 % entre lacs artificiels/retenues ne présentent pas de différence significative.

## **Réponses des peuplements piscicoles à la qualité et/ou à l'altération des habitats**

Sur les lacs naturels, la présente étude a mis en évidence des corrélations significatives simples entre les métriques piscicoles et les variables relatives à la qualité et à la dégradation des habitats. Nous observons une corrélation positive entre la proportion d'espèces phytolithophiles et les activités sur le lac. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que les usages sur les lacs sont susceptibles d'entraîner une altération des sites de reproduction (macrophytes ou substrats minéraux) favorisant les espèces opportunistes qui attachent peu d'importance au support de ponte.

Nous avons également observé un coefficient de corrélation négatif entre deux mesures liées au caractère planctivore des espèces et le score du LHQA ce qui est écologiquement plus difficile à expliquer.

La richesse spécifique de cyprinidés par rapport aux percidés augmente avec l'altération des habitats. L'hypothèse qui peut être avancée est la maximisation du succès reproducteur des cyprinidés qui adaptent leurs stratégies de vie (multiplication des pontes, zones de pontes non sélectives) (Keith and Allardi, 2001).

Les corrélations positives entre la dégradation des habitats et les captures et biomasse de chevesnes peuvent être dues au caractère tolérant de cette espèce vis-à-vis de la qualité du milieu dans lequel elle évolue.

Les captures de tanches sont liées de manière positive à la sédimentation. Cette espèce se nourrit principalement sur les fonds vaseux (Kottelat and Freyhof, 2007) qui peuvent être plus importants en cas d'apports de fines provenant du bassin versant, notamment au travers de pratiques agricoles (cultures intensives, déforestation) (Bragg et al., 2003).

Les biomasses de sandres et de poissons chat sont négativement corrélées avec la sédimentation. En effet, ces espèces préfèrent se reproduire sur des substrats minéralisés, or la sédimentation implique un dépôt et une accumulation de particules dans les espaces interstitiels des graviers et des cailloux (Bilotta and Brazier, 2008; Launois, 2011). Cela induit un échange insuffisant de dioxygène entre l'eau et les œufs et/ou les larves entraînant leur mortalité (Greig et al., 2005; Launois, 2011).

L'observation de corrélations négatives entre les captures et la biomasse de brèmes commune avec la qualité des habitats peut être due au fait que c'est une espèce peu exigeante vis-à-vis de la qualité du milieu dans lequel elle vit.

Sur les retenues, aucune corrélation simple n'a été observée tant avec les variables de qualité des habitats qu'avec celles relatives à leur altération.

Lorsque l'on ne prend pas en compte l'effet de l'environnement naturel, on observe donc des corrélations significatives entre métriques et pressions. Par contre, les modèles ne nous ont pas permis de mettre en évidence les effets de l'altération des habitats sur les peuplements piscicoles en zone littorale par l'utilisation du Lake Habitat Survey. En effet, à partir des paramètres utilisés dans cette étude, la variance des métriques est peu expliquée. Cela suggère qu'une partie des réponses observées dans les corrélations simples, en particulier sur les lacs naturels, est liée à l'environnement naturel et ne contribue que peu à expliquer la variabilité des métriques. Pourtant, plusieurs publications ont démontré que les pressions anthropiques affectent la qualité des habitats littoraux et les peuplements piscicoles (Causse et al., 2012; Drake and Pereira, 2002; Jennings et al., 1999; Scheuerell and Schindler, 2004; Schindler et al., 2000; Sharma et al., 2012). Par exemple, l'agrégation spatiale des peuplements piscicoles semble diminuer avec l'augmentation de l'urbanisation en zone riveraine (Scheuerell and Schindler, 2004).

Diverses hypothèses peuvent être avancées pour expliquer nos résultats:



- certains sous-scores du Lake Habitat Survey ne sont pas des bons descripteurs de la qualité des habitats et/ou de leurs altérations au regard des peuplements piscicoles. Néanmoins, les corrélations significatives observées dans l'analyse des corrélations simples suggèrent la pertinence d'au moins certains sous-scores pour les lacs naturels ;
- les caractéristiques de l'ichtyofaune ne permettent pas de rendre compte de l'effet de l'habitat ;
- les lacs étudiés, quel que soit le type, sont caractérisés par une grande hétérogénéité en terme d'environnement naturel qui masque l'effet des pressions sur l'ichtyofaune;
- les observations réalisées généralement en fin de période estivale ne sont peut être pas optimales pour rendre compte des exigences des espèces vis-à-vis des habitats littoraux. Des pêches de printemps seraient peut-être plus appropriées.

## **Perspectives**

Face au manque de résultats avec le LHS (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2006), le calcul d'autres descripteurs hydromorphologiques seront envisagés, en particulier ceux issus de l'application des protocoles AIBer (ALTérations des BERges) (Alleaume et al., 2012a) et Charli (protocole de Caractérisation des HABitats des Rives et du Littoral) (Alleaume et al., 2012b). Cependant, ces protocoles nécessitent d'être mis en œuvre sur plus de lacs afin de disposer d'un jeu de données conséquent. Ils permettent une caractérisation fine de la nature des habitats et de leurs modifications à partir d'une photo-interprétation associée à des relevés de terrain (Alleaume et al., 2012a; Alleaume et al., 2012b). Un indice de qualité hydromorphologique, répondant aux exigences de la DCE et issu de ces protocoles, sera développé très prochainement au Pôle Onema/Irstea.

De plus, il serait essentiel d'introduire dans les modèles des informations sur le marnage (fréquence et amplitude) car c'est une variable structurant fortement les peuplements piscicoles. Une enquête auprès des gestionnaires pourrait être initiée afin de centraliser des données sur cette variable.

Un indice poisson multi-métrique est en cours de développement sur les retenues au pôle Onema/Irstea. D'autres méthodes statistiques sont testées afin de cibler des métriques dont la sensibilité varie selon un gradient de pressions, notamment hydromorphologiques. Il pourrait également être pertinent de tester un autre type d'approche en créant une typologie basée sur les variables naturelles connues pour influencer les peuplements piscicoles afin de s'affranchir de l'hétérogénéité entre les lacs d'un même type. De nouvelles caractéristiques de la faune piscicole pourraient être calculées telles que des métriques sur l'abondance des juvéniles ou sur la structure en taille.

Une stratification de l'échantillonnage par l'habitat permettrait de rendre compte plus facilement des liens entre l'ichtyofaune et la qualité des habitats littoraux. De même, des pêches de printemps ciblées sur les juvéniles permettraient de mieux mettre en exergue la potentialité des habitats vis-à-vis de la reproduction.



## Conclusion

La présente étude a mis en évidence que la zone littorale rassemble une part significative de l'information sur la faune piscicole lacustre. Sur les lacs naturels, seules des corrélations simples ont été observées entre quelques métriques et des variables d'altération des habitats. En revanche, les modèles développés ne permettent pas d'établir des liens entre les peuplements piscicoles et les pressions anthropiques locales. Cette étude ne peut, par conséquent, pas confirmer notre postulat de départ.

## Bibliographie

- Abrahamsson O, Håkanson L. Modelling seasonal flow variability of European rivers. *Ecological Modelling* (1998) 114:49-58.
- Acreman MC, Dunbar MJ, Hannaford J, Black AR, Rowan JS, Bragg OM. Development of environmental standards (water resources) - Stage 1: Identification of hydro-morphological parameters to which the aquatic ecosystem is sensitive (2005) Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology. 100.
- Alleaume S, Argillier C. Corila : Corridors Rivulaires Lacustres (version 2012) (2012) Aix en Provence: Irstea. 22.
- Alleaume S, Lanoiselée C. Bathymétrie - Protocole de levé bathymétrique - V1 (2010) Aix-en-Provence: Cemagref.
- Alleaume S, Lanoiselée C, Argillier C. AlBer : Protocole de caractérisation des Altérations des Berges (version 2012) (2012a) Aix en Provence: Irstea. 30.
- Alleaume S, Lanoiselée C, Bochet J-C, Argillier C. Suivi hydromorphologique des plans d'eau dans le cadre de la DCE en Adour-Garonne (2009) Aix en Provence: Cemagref. 48.
- Alleaume S, Lanoiselée C, Heyd C, Argillier C. Charli : Protocole de Caractérisation des HABITATS des Rives et du Littoral (version 2012) (2012b) Aix en provence: Irstea. 30.
- Appelberg M, et al. Development and intercalibration of methods in nordic freshwater fish monitoring. *Water, Air and Soil Pollution* (1995) 85:401-406.
- Argillier C. Les communautés de poisson en bioindication lacustre. In: *Mer & Littoral - Lacs & Cours d'eau* (2007). 67-69.
- Argillier C, Pronier O, Irz P. Approche typologique des peuplements piscicoles lacustres Français. I. Les communautés des plans d'eau d'altitude supérieure à 1500 m. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture* (2002a) 365/366:373-387.
- Argillier C, Pronier O, Irz P, Molinier O. Approche typologique des peuplements piscicoles lacustres Français. II. Structuration des communautés dans les plans d'eau d'altitude inférieure à 1500m. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture* (2002b) 365/366:389-404.
- Baron JS, et al. Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications* (2002) 12:1247-1260.
- Benson BJ, Magnuson JJ. Spatial heterogeneity of littoral fish assemblages in lakes: relation to species diversity and habitat structure. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (1992) 49:1493-1500.
- Bilotta GS, Brazier RE. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research* (2008) 42:2849-2861.
- Bragg OM, Duck RW, Rowan JS, Black AR. Review of methods for assessing the hydromorphology of lakes (2003): Environment Agency, University of Dundee. 130.
- Breiman L. Classification and regression trees. (1984): Chapman & Hall.
- Bryhn AC. A morphometrically based method for predicting water layer boundaries in meromictic lakes. *Hydrobiologia* (2009):1-7.
- Carignan R, Perceval O, Prairie Y, Parkes A. Développement d'un outil de prévention de l'eutrophisation des lacs des Laurentides et de l'Estrie (2007).
- Causse S, Gevrey M, Argillier C. Développement et optimisation des méthodes de bioindication pour les plans d'eau (2012) Aix en Provence. 48.
- Commissariat Général au Développement Durable. NOPOLU-volet Agricole - Guide méthodologique--Ministère de l'Ecologie dIE, du Développement durable et de la Mer, ed. (2010). 115.
- Crowder LB, Cooper WE. Habitat structural complexity and the interaction between bluegills and their prey. *Ecology* (1982) 63:1802-1813.
- Danis P-A, Argillier C. Seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie : Plans d'eau. Convention Onema/Cemagref (2011):49.
- Danis P-A, Argillier C. Seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie : Synthèse des travaux 2012. Convention Onema/Irstea (2013).

- Danis P-A, Ferrer R, Gevrey M, Argillier C. Seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie : Plans d'eau naturels. Convention Onema/Irstea (2012):60.
- Daufresne M, Boet P. Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology* (2007) 13:2467-2478.
- Davies-Colley RJ. Mixing depths in New Zealand lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* (1988) 22:517 - 528.
- De'ath G, Fabricius KE. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* (2000) 81:3178-3192.
- De Bortoli J, Argillier C. Hydromorphologie lacustre, mesure de son altération et réponses biologiques - Etude bibliographique (2006). 34.
- De Bortoli J, Argillier C. Hydromorphologie lacustre, mesure de son altération et réponses biologiques - Etude bibliographique (2006) Montpellier: Cemagref. 28.
- Deceliere-Vergès C, Argillier C, Lanoiselée C, De Bortoli J, Guillard J. Stability and precision of the fish metrics obtained using CEN multi-mesh gillnets in natural and artificial lakes in France. *Fisheries Research* (2009) 99:17-25.
- Drake MT, Pereira DL. Development of a fish-based index of biotic integrity for small inland lakes in central Minnesota. *North American Journal of Fisheries Management* (2002) 22:1105-1123.
- Eadie JM, Keast A. Resource heterogeneity and fish species diversity in lakes. *Canadian Journal of Zoology* (1984) 62:1689-1695.
- Everett RA, Ruiz GM. Coarse woody debris as a refuge from predation in aquatic communities - an experimental test. *Oecologia* (1993) 93:475-486.
- Folton N, Lavabre J. Approche par modélisation PLUIE-DEBIT pour la connaissance régionale de la ressource en eau : application à la moitié du territoire français. *La Houille Blanche* (2007) 3.
- Forman RTT, Alexander LE. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* (1998) 29:207-231.
- Greig SM, Sear DA, Carling PA. The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: Implications for sediment management. *Science of the Total Environment* (2005) 344:241-258.
- Håkanson L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology - ranking based on statistical analyses. *Hydrobiologia* (2005) 541:117-137.
- Håkanson L, Blenckner T, Malmaeus JM. New, general methods to define the depth separating surface water from deep water, outflow and internal loading for mass-balance models for lakes. *Ecological Modelling* (2004) 175:339-352.
- Håkanson L, Boulion VV. A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes. *Ecological Modelling* (2001) 140:235-245.
- Håkanson L, Bryhn AC. A dynamic mass-balance model for phosphorus in lakes with a focus on criteria for applicability and boundary conditions. *Water, Air, and Soil Pollution* (2008) 187:119-147.
- Hering D, Feld CK, Moog O, Ofenbock T. Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: Experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. *Hydrobiologia* (2006a) 566:311-324.
- Hering D, Johnson RK, Kramm S, Schmutz S, Szoszkiewicz K, Verdonschot PFM. Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress. *Freshwater Biology* (2006b) 51:1757-1785.
- Heyd C, Alleaume S, Argillier C. BAVELA, BAssin VEr sant LAcustre: Méthode de délimitation et extraction de données spatiales (2012) Aix-en-Provence: Irstea.
- Hondzo M, Stefan G. Long-term lake water quality predictors. *Water Resources* (1996) 30:2835-2852.
- Hutchinson GE. A treatise on limnology. Vol.I : Geography, physics and chemistry. (1957): John Wiley.
- Ihaka R, Gentleman R. R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics* (1996) 5:299-314.
- Irz P, et al. Fish community comparisons along environmental gradients in lakes of France and Northeast U.S.A. *Global Ecology and Biogeography* (2007) 16:350-366.

- Irz P, Odion M, Argillier C, Pont D. Comparison between the fish communities of lakes, reservoirs and rivers: can natural systems help define the ecological potential of reservoirs? *Aquatic Sciences* (2006) 68:109-116.
- Jackson DA, Peres-Neto PR, Olden JD. What controls who is where in freshwater fish communities - the roles of biotic, abiotic, and spatial factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (2001) 58:157-170.
- Jennings MJ, Bozek MA, Hatzenbeler GR, Emmons EE, Staggs MD. Cumulative effects of incremental shoreline habitat modification on fish assemblages in North temperate lakes. *North American Journal of Fisheries Management* (1999) 19:18-27.
- Johansson H, Brodin AA, Håkanson L. New approaches to the modelling of lake basin morphometry. *Environmental Modeling & Assessment* (2007) 12:213-228.
- Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* (1981) 6:21-27.
- Karr JR, Fausch KD, Angermeier PL, Yant PR, Schlosser IJ. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale. *Illinois Natural History Survey Special Publications* (1986) 5:28p.
- Keast A. Trophic and spatial interrelationships in the fish species of an Ontario temperate lake. *Environmental Biology of Fishes* (1978) 3:7-31.
- Keith P, Allardi J. Bilan des introductions de poissons d'eau douce en France. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture* (1997) 344/345:181-191.
- Keith P, Allardi J. Atlas des poissons d'eau douce de France. (2001) Paris: Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Kõiv T, Nõges T, Laas A. Phosphorus retention as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative depth in 54 lakes and reservoirs. *Hydrobiologia* (2010):1-11.
- Kottelat M, Freyhof J. *Handbook of European Freshwater Fishes*. (2007).
- Launois L. Impact des facteurs anthropiques sur les communautés piscicoles lenticques : vers l'élaboration d'un indice poisson. In: *Sciences de l'environnement* (251) (2011) Aix-Marseille: Université de Provence. 209.
- Launois L, Veslot J, Irz P, Argillier C. Selecting fish-based metrics responding to human pressures in French natural lakes and reservoirs: towards the development of a fish-based index (FBI) for French lakes. *Ecology of Freshwater Fish* (2010) 20:120-132.
- Launois L, Veslot J, Irz P, Argillier C. Development of a fish-based index (FBI) of biotic integrity for French lakes using the hindcasting approach. *Ecological Indicators* (2011) 11:1572-1583.
- Mensing DM, Galatowitsch SM, Tester JR. Anthropogenic effects on the biodiversity of riparian wetlands of a northern temperate landscape. *Journal of Environmental Management* (1998) 53:349-377.
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Circulaire DCE 2005/11 relative à la typologie nationale des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eau de transition et eaux côtières) en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. In: *Bulletin Officiel* (2005). 14.
- Moses SA, Janaki L, Joseph S, Justus J, Vimala SR. Influence of lake morphology on water quality. *Environmental Monitoring and Assessment* (2011) 182:443-454.
- Müller B, Lotter AF, Sturm M, Ammann A. Influence of catchment quality and altitude on the water and sediment composition of 68 small lakes in Central Europe. *Aquatic Sciences* (1998) 60:316-337.
- Numberg GK. A simple model for predicting the date of fall turnover in thermally stratified lakes. *Limnology & Oceanography* (1988) 33:1190-1195.
- Olden JD, Jackson DA, Peres-Neto PR. Spatial isolation and fish communities in drainage lakes. *Oecologia* (2001) 127:572-585.
- Ottosson F, Hakanson L. Presentation and analysis of a model simulating the pH response of lake liming. *Ecological Modelling* (1997) 105:89-111.
- Persson L. Predator-mediated competition in prey refuges: the importance of habitat dependent prey resources. *Oikos* (1993) 68:12-22.

- Pitt R, Field R, Lalor M, Brown M. Urban stormwater toxic pollutants: assessment, sources, and treatability. *Water Environment Research* (1995) 67:260-275.
- Pompilio L, Ambrosetti W, Barbanti L. Morphometry and thermal stratification in Italian lakes. 1. Predicative models. *Memorie - Istituto Italiano di Idrobiologia* (1996) 54:1-29.
- Pourriot R, Meybeck M. *Limnologie générale*. (1995) Paris: Masson.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. (2012) Vienna, Austria. Available at: <http://www.R-project.org>; R Foundation for Statistical Computing.
- Rowan JS, Bragg OM, Duck RW, Black AR. Development of a technique for lake habitat survey (LHS): Scoping study. Final report (2003) Dundee: Environmental Systems Research Group. 55.
- Rowan JS, et al. Development of a technique for Lake habitat survey (LHS) with applications for the European Union Water Framework Directive. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* (2006) 16:637-657.
- Scheuerell MD, Schindler DE. Changes in the spatial distribution of fishes in lakes along a residential development gradient. *Ecosystems* (2004) 7:98-106.
- Schindler DE, Geib SI, Williams MR. Patterns of fish growth along a residential development gradient in north temperate lakes. *Ecosystems* (2000) 3:229-237.
- Schmieder K. European lake shores in danger - concepts for a sustainable development. *Limnologica* (2004) 34:3-14.
- Sharma S, Legendre P, Boisclair D, Gauthier S. Effects of spatial scale and choice of statistical model (linear versus tree-based) on determining species-habitat relationships. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (2012) 69:2095-2111.
- Simon TP. Development of Index of Biotic Integrity Expectations for the Ecoregions of Indiana. I. Central Corn Belt Plain--Agency EP, ed. (1991) Chicago: EPA. 93.
- Sliva L, Williams DD. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water Research* (2001) 35:3462-3472.
- Therneau T, Atkinson B, Ripley B. *Recursive Partitioning* (2012).
- Tong STY, Chen WL. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management* (2002) 66:377-393.
- Tonn WM, Magnuson JJ. Patterns in the species composition and richness of fish assemblages in northern Wisconsin lakes. *Ecology* (1982) 63:1149-1166.
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux J-M. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* (2009).
- Wetzel RG. Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. In: *Reservoir limnology: ecological perspective*--Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE, eds. (1990) New York: John Wiley & Sons, Inc. 227-238.
- Winfield IJ. Fish in the littoral zone: ecology, threats and management. *Limnologica* (2004) 34:124-131.

## Annexes

**Annexe 1** : Liste des lacs français utilisés pour la présente étude

**Annexe 2** : Liste des variables environnementales utilisées dans cette étude d'après (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012)

**Annexe 3** : Détails du calcul du Lake Habitat Quality Assessment

**Annexe 4** : Liste des pressions utilisées dans cette étude d'après (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012)

**Annexe 5** : Détails du calcul du Lake Habitat Modification Score

**Annexe 6** : Classification des 47 espèces piscicoles capturées sur les lacs nationaux en guildes fonctionnelles

**Annexe 7** : Distribution des métriques piscicoles calculées sur les 42 lacs naturels DCE pêchés et échantillonnés avec le LHS (encadré en rouge, les métriques non utilisées lors de la modélisation)

**Annexe 8** : Distribution des métriques piscicoles calculées sur les 145 retenues DCE pêchées et échantillonnées avec le LHS (encadré en rouge, les métriques non utilisées lors de la modélisation)



**Annexe 1 : Liste des lacs français utilisés pour la présente étude**

Agence: AG/Adour Garonne, AP/Artois Picardie, LB/Loire Bretagne, RM/Rhin Meuse, RMC/Rhône Méditerranée Corse, SN/Seine Normandie ; Type : A/lacs artificiels, R/retenues, LN/lacs naturels ; LHS : X/lacs échantillonnés avec le Lake Habitat Survey

Onema Dir	Agence	Type	Nom	Code	Année pêche	LHS
1	SN	R	Ailette (barrage de l' )	AIL02	2010	X
1	AP	A	Ardres (marais d' )	ARD62	2011	X
1	AP	A	Audomarois (marais de l' ) (Romelaere)	AUD62	2009	X
1	SN	A	Grande-paroisse (base de loisirs de la )	BGP77	2009	
1	SN	A	Cannes-Ecluse les seiglats (gravière de )	CAN77a	2008	
1	SN	A	Cannes-Ecluse les gravelottes (gravière de )	CAN77b	2008	
1	SN	A	Cannes-Ecluse la maserotte (gravière de )	CAN77c	2008	X
1	SN	A	Cergy-neuville (base de plein air et de loisirs de )	CER95	2010	
1	AP	R	Val Joly (lac du )	EVJ59	2008	X
1	SN	R	Gast (barrage du )	GAS14	2011	X
1	SN	A	Jablins (base de plein air et de loisirs de )	JAB77	2011	
1	SN	A	Deux Amants (base de plein air et de loisirs de Léry-	LER27a	2009	X
1	SN	A	Pont-l'Evêque (plan d'eau de )	PPE14	2008	X
1	SN	R	Rabodanges (barrage de )	RAB61	2009	X
1	SN	A	Toutainville (plan d'eau de )	TOU27	2008	
1	SN	R	Vezins (barrage de )	VEZ50	2010	
1	AP	A	Vignoble (étang du )	VIG59	2010	X
1	SN	A	Vaires-sur-Marne (base de )	VSM77	2010	
2	LB	R	Marcille (étang de )	MAR35	2007	X
2	LB	R	Angle guignard (retenue de )	ANG85	2008	X
2	LB	R	Apremont (retenue d' )	APR85	2007	X
2	LB	R	Arzal (retenue d' )	ARZ35	2007	X
2	LB	R	Aumée (étang )	AUM44	2008	X
2	LB	R	Bultiere (retenue de la )	BUL85	2007	X
2	LB	R	Carcraon (étang de )	CAR35	2010	X
2	LB	R	Duc (étang au )	DUC56	2008	X
2	LB	R	Pain Tourteau (étang de )	EPT35	2010	X
2	LB	R	Forge (étang de la )	FOR35	2008	X
2	LB	LN	Grand-lieu	GDL44	2008	
2	LB	R	Gouet (retenue du )	GOU22	2009	X
2	LB	R	Graon (retenue du )	GRA85	2009	X
2	LB	R	Hardouiniais (étang de la )	HAR22	2009	X
2	LB	R	Jugon (étang de ) [complexe de Ville-Hatte]	JUG22	2008	
2	LB	R	Jaunay (retenue du )	LEJ85	2009	X
2	LB	R	Marillet (lac du ) [complexe du Marillet]	LEM85	2009	X
2	LB	R	Mervent [complexe de Mervent]	MER85	2007	X
2	LB	R	Ouée (étang d' )	OUE35	2010	X
2	LB	R	Pont de fer (étang du )	PDF44	2010	X
2	LB	R	Provostiere (étang de la )	PRO44	2010	X
2	LB	R	Bois Joli (retenue du ) [complexe du Bois Joli]	RBJ35	2009	X
2	LB	R	Chapelle Erbrée (retenue de la )	RCE35	2009	X
2	LB	R	Valiere (retenue de la )	RDV35	2009	X
2	LB	R	Rincerie (étang de la )	RIN53	2010	X
2	LB	A	Rivière Kersan (gravières de la )	RIV35	2008	X
2	LB	R	Kerne Uhel (retenue de )	RKU22	2008	X
2	LB	R	Moulin Neuf (retenue du )	RMN29	2008	X
2	LB	R	Moulin Papon (retenue de )	RMP85	2009	X
2	LB	R	Rochereau	ROC85	2009	X
2	LB	R	Cheze (retenue de la )	RST35	2009	X
2	LB	R	Ville-Hatte (retenue de la ) - retenue d'Arguenon	RVH22	2009	X
2	LB	R	Saint Fraimbault de Prieres (retenue de )	SFP53	2006	X
2	LB	R	Sillonniere (retenue de la )	SIL85	2009	X
2	LB	R	Saint Michel	SMI29	2006	X
2	LB	R	Vioreau (étang de )	VIO44	2006	X
3	SN	R	Amance (barrage-réservoir aube lac )	AMA10	2011	X



3	RM	R	Bairon (étang de)	BAI08	2008	X
3	RM	R	Bouzey (réservoir de)	BOU88	2010	
3	SN	R	Charmes (barrage de)	CHA52	2010	X
3	RM	LN	Gérardmer	GER88	2011	X
3	SN	R	Auzon-Temple (barrage-réservoir aube lac)	LAT10	2006	
3	SN	R	Liez (barrage de la)	LIE52	2009	X
3	RM	R	Kruth-Wildenstein (lac de)	LKW68	2009	
3	RM	LN	Longemer	LON88	2010	
3	RM	R	Madine (étang de la)	MAD55	2011	X
3	RM	R	Michelbach (retenue du)	MIC68	2010	
3	SN	R	Mouche (barrage de la) [Saint Ciergues]	MOU52	2008	
3	RM	A	Munchhausen (gravière de)	MUN67	2009	
3	RM	R	Parroy (étang de)	PAR54	2008	X
3	RM	A	Richardménil	RIC54	2006	
3	SN	R	Forêt d'Orient (barrage-réservoir seine lac de la)	SEI10	2008	X
3	RM	R	Vieilles forges (retenue des)	VFO08	2008	X
4	AG	R	Mas Chaban (barrage du)	BMC16	2010	X
4	LB	R	Cebron (retenue du)	CEB79	2009	X
4	LB	R	Chardes (retenue de) [complexe de Chardes]	CHA86	2006	X
4	LB	R	Eguzon [complexe d'Eguzon]	EGU36	2011	X
4	AG	R	Lavaud (barrage de)	LAV16	2011	X
4	LB	R	Du puits (étang)	PUI18	2011	X
4	LB	R	Sidiailles (retenue de)	SID18	2009	X
4	LB	R	Touche Poupart (retenue de la)	TOU79	2010	X
4	LB	R	Vallee (étang de la)	VAL45	2007	X
5	RMC	LN	Aiguebelette	AIG73	2009	X
5	RMC	R	Allement (lac d')	ALL01	2010	X
5	RMC	LN	Annecy (lac d')	ANN74	2010	X
5	RMC	A	Anse (gravière d')	ANS69	2011	X
5	RMC	LN	Anterne (lac d')	ANT74	2007	X
5	RMC	LN	Barterand (lac de)	BAR01	2007	
5	RMC	LN	Bourget	BOU73	2010	X
5	RMC	R	Chambon (lac du)	CHA38	2010	X
5	RMC	R	Coiselet (de)	COI39	2010	X
5	RMC	A	Eaux bleues (des)	GEB69	2009	X
5	LB	R	Grangent	GRA42	2006	X
5	LB	LN	Issarlès (lac d')	ISS07	2009	X
5	RMC	LN	Laffrey (grand lac de)	LAF38	2009	X
5	RMC	LN	Léman (lac)	LEM74	2010	
5	RMC	LN	Pierre-châtel (lac de)	LPC38	2007	X
5	RMC	R	Monteynard- Avignonet	MON38	2009	X
5	RMC	LN	Montriond (lac de)	MON74	2006	
5	RMC	LN	Nantua (lac de)	NAN01	2008	X
5	RMC	R	Notre-Dame de Commiers (de)	NDC38	2008	X
5	RMC	LN	Paladru	PAL38	2011	X
5	RMC	LN	Petitchet	PET38	2008	X
5	RMC	R	Cize-Bolozon (de)	RCB01	2010	X
5	RMC	R	Charmines-Moux (de)	RCM01	2008	X
5	RMC	A	Grand-large (du)	RGL69	2008	X
5	RMC	R	Mont-cenis (du)	RMC73	2011	X
5	RMC	R	Sautet (lac du)	SAU38	2009	X
5	RMC	LN	Sylans (lac de)	SYL01	2008	
5	LB	R	Villerest (retenue de)	VIL42	2006	X
6	AG	R	Aigle (de l')	AIG15	2010	X
6	LB	LN	Aydat (lac d')	AYD63	2011	X
6	LB	LN	Bordes (lac des)	BOR63	2005	X
6	LB	LN	Bouchet (lac du)	BOU43	2005	X
6	LB	LN	Bourdouze (lac de)	BOU63	2005	X
6	LB	LN	Cassiere (lac de la)	CAS63	2005	X
6	LB	R	Chammet (retenue du)	CHA23	2006	X
6	LB	LN	Chambon (lac)	CHA63	2005	X
6	AG	R	Enchanet	ENC15	2010	X
6	AG	R	Feyt (lac de)	FEY19	2008	X

6	LB	A	Bas-en-Basset (gravières de )	GBB43	2010	
6	LB	R	Goule (étang de )	GOU03	2009	X
6	AG	R	Grandval	GRA15	2009	X
6	AG	R	Hautefage (barrage de )	HAU19	2011	X
6	AG	R	Lavaud Amont (plan d'eau de )	LAD16	2010	X
6	LB	R	Lavaud Gelade	LAV23	2011	X
6	AG	R	Méouze (étang de )	MEO23	2008	X
6	LB	LN	Montcineyre (lac de )	MON63	2005	X
6	LB	LN	Pavin (lac )	PAV63	2005	X
6	LB	R	Pirot (étang de )	PIR03	2010	
6	LB	R	Champsanglard (retenue de ) [complexe de l'Age]	RDC23	2008	X
6	LB	R	Fades Besserve (retenue des )	RFB63	2006	X
6	LB	R	Rochebut (retenue de ) [complexe de Rochebut]	ROC03	2010	X
6	AG	R	Saint Etienne de Cantalès	SEC15	2008	X
6	AG	R	Treignac / bariousses (lac des )	TRE19	2010	X
6	AG	R	Triouzoune (barrage de la )	TRI19	2009	X
7	AG	R	Astarac (barrage-réservoir de l' )	AST32	2010	X
7	AG	LN	Aureilhan (étang d' )	AUR40	2008	X
7	AG	R	Ayguelongue (barrage de l' )	AYG64	2011	X
7	AG	R	Bage	BAG12	2011	X
7	AG	R	Baradée (barrage de la )	BAR32	2011	X
7	AG	R	Castelnau-Lassouts (barrage de )	BCL12	2010	X
7	AG	R	Duhort-Bachen (barrage de )	BDB40	2010	X
7	AG	LN	Biscarrosse (petit étang de )	BIS40	2008	X
7	AG	LN	Blanc (étang du )	BLA40	2008	X
7	AG	R	Miramont Sensacq (barrage de )	BMS40	2009	X
7	AG	A	Bordeaux (lac de )	BOR33	2008	X
7	AG	R	Saint-Ferréol (bassin de )	BSF31	2011	X
7	AG	R	Saint-Jean (barrage de )	BSJ32	2011	X
7	AG	R	Candau (barrage de )	CAN32	2011	X
7	AG	LN	Cazaux (étang de )	CAZ40	2005	X
7	AG	LN	Carcans-Hourtin (étang de )	ECH33	2007	X
7	AG	R	Filleit (barrage du )	FIL09	2005	X
7	AG	LN	Gaube	GAU65	2006	X
7	AG	R	Gioulé (barrage de la )	GIO40	2011	X
7	AG	R	Gouyré (barrage du )	GOU82	2011	X
7	AG	R	Hagetmau-Monsegur (barrage d' )	HAG40	2010	X
7	AG	R	Laouzas (lac de )	LAO81	2005	X
7	AG	R	Laragou (barrage de )	LAR31	2010	X
7	AG	LN	Léon (étang de )	LEO40	2009	X
7	AG	R	Lescouroux (barrage de )	LES24	2011	X
7	AG	R	Louet (barrage du )	LOU64	2011	X
7	AG	R	Lunax (barrage de )	LUN32	2009	X
7	AG	R	Maury (lac de )	MAU12	2008	X
7	AG	R	Miélan (lac de )	MIE32	2005	X
7	AG	R	Orx (marais d' )	ORX40	2010	X
7	AG	LN	Parentis	PAR40	2008	X
7	AG	R	Poucharramet (barrage de )	POU31	2011	X
7	AG	R	Prade (lac de la )	PRA33	2009	X
7	AG	R	Sarrans (lac du barrage de )	SAR15	2008	X
7	AG	LN	Soustons (étang de )	SOU40	2005	X
7	AG	R	Tailluret (barrage de )	TAI40	2011	X
7	AG	R	Tordre (barrage du )	TOR82	2011	X
7	AG	R	Thoux-Saint-Cricq (lac de )	TSC32	2010	X
7	AG	R	Uby (lac de l' )	UBY32	2010	X
7	AG	R	Villefranche de Panat (lac de )	VIL12	2010	X
8	RMC	R	Alesani (retenue de l' )	ALE2B	2008	X
8	RMC	LN	Allos (lac d' )	ALL04	2006	X
8	AG	R	Alzeau (barrage de l' )	ALZ81	2011	X
8	RMC	LN	Aulnes (étang des )	AUL13	2011	X
8	RMC	R	Avène (réservoir d' )	AVE34	2009	X
8	RMC	R	Bimont (lac du )	BIM13	2007	X
8	RMC	R	Calacuccia (retenue de )	CAL2B	2010	X

8	RMC	R	Caramany (retenue de )	CAR66	2009	X
8	RMC	R	Carcès (lac de )	CAR83	2008	X
8	RMC	R	Castillon (lac de )	CAS04	2010	X
8	AG	R	Charpal (lac de )	CHA48	2010	X
8	RMC	R	Codole (retenue de )	COD2B	2008	X
8	RMC	LN	Entressen (d' )	ENT13	2007	X
8	RMC	R	Esparron (lac d' )	ESP04	2010	X
8	AG	R	Estrade (retenue de l' )	EST11	2010	X
8	RMC	R	Figari (de )	FIG2B	2009	X
8	RMC	A	Jouarres (étang de )	JOU11	2008	X
8	RMC	R	Ospédale (retenue de l' )	OSP2A	2009	X
8	RMC	A	Plantain (de )	PLA13	2008	X
8	RMC	LN	Pradeilles (de )	PRA66	2006	X
8	RMC	R	Puylaurent (retenue de )	PUY48	2008	
8	RMC	R	Quinson (retenue de )	QUI04	2011	
8	AG	R	Raviège (lac la )	RAV34	2011	X
8	RMC	R	Réaltor (bassin du )	REA13	2008	X
8	RMC	R	Laprade basse (de )	RLB11	2008	X
8	RMC	R	Saut de vezoles (retenue du )	RSV34	2008	X
8	RMC	R	Saint Cassien (lac de )	SCA83	2007	X
8	RMC	R	Sainte Croix (lac de )	SCR04	2009	X
8	RMC	R	Serre ponçon	SPO04	2011	X
8	RMC	R	Tolla (lac de )	TOL2A	2007	X
8	RMC	R	Vinça (retenue de )	VIN66	2009	X
8	RMC	R	Zola	ZOL13	2009	
9	RMC	LN	Abbaye (l' )	ABB39	2010	X
9	SN	R	Bourdon (barrage du )	BOU89	2010	X
9	SN	R	Saint-Agnan (barrage de )	BSA58	2009	X
9	SN	R	Cercey (barrage de )	CER21	2009	
9	LB	R	Chamboux (retenue de )	CHA21	2008	X
9	RMC	R	Châtelot (du )	CHA25	2010	X
9	RMC	LN	Chalain (lac de )	CHA39	2011	X
9	SN	R	Chaumeçon (barrage de )	CHA58	2009	
9	SN	R	Crescent (barrage du )	CRE89	2011	X
9	RMC	LN	Entonnoir-bouverans (l' )	ENT25	2008	X
9	RMC	LN	Etival (grand lac )	ETI39	2006	X
9	RMC	LN	Clairvaux (Grand lac)	GLC39	2009	X
9	RMC	LN	Ilay (lac d' )	ILA39	2009	X
9	RMC	R	Chazilly (de )	LDC21	2008	
9	RMC	LN	Chaillexon (lac de )	LDC25	2007	X
9	RMC	LN	Grand maclu (lac du )	LGM39	2005	X
9	RMC	LN	Rousses (lac des )	LRO39	2008	X
9	RMC	A	Montaubry (barrage de )	MON71	2008	X
9	RMC	R	Panthier (lac de )	PAN21	2008	X
9	SN	R	Pont (barrage de )	PON21	2011	X
9	RMC	R	Champagney (bassin de )	RCS70	2011	
9	RMC	LN	Remoray (lac de )	REM25	2009	X
9	LB	R	Pont du Roi (retenue du )	RPR71	2008	X
9	LB	R	Torcy Neuf (retenue de )	RTN71	2010	X
9	LB	R	Torcy Vieux (retenue de )	RTV71	2008	X
9	LB	R	Sorme (retenue de la )	SOR71	2008	X
9	RMC	LN	Saint Point	SPO25	2009	X
9	RMC	LN	Val (lac du )	VAL39	2010	X
9	RMC	R	Vouglans (lac de )	VOU39	2008	X
9	RMC	A	Vaivre Vesoul (lac du )	VVE70	2008	X
9	RMC	LN	Pormenaz (Lac de )	POR74	2007	

**Annexe 2 : Liste des variables environnementales utilisées dans cette étude d'après (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012) (les colonnes LN et R sont cochées lorsque les variables sont disponibles pour ces deux types de lacs)**

LN	R	Code	Définition	Formule	Source
x	x	Abraha_Q	flux moyen annuel entrant dans le plan d'eau	$(0.38 * \text{SurfBV} * \text{Prec} * 1000) / (60 * 60 * 24 * 365.25)$	(Abrahamsson and Håkanson, 1998)
x	x	Abraha_TpsRes	estimation du temps de résidence à partir du flux moyen entrant tel que définit par Abrahamson	$\text{Vol} / \text{Abraha\_Q}$	(Abrahamsson and Håkanson, 1998)
x	x	Abraha_WQ	facteur quantifiant l'influence du débit moyen annuel d'une rivière sur la variabilité saisonnière (inter-mensuelle) de ce même débit	$(\text{Abraha\_Q} / 5000)^{0.22}$	(Abrahamsson and Håkanson, 1998)
x	x	Abraha_Walt	facteur quantifiant l'influence de l'altitude sur la variabilité saisonnière (inter-mensuelle) de ce même débit	$(\text{alt} / 1000)^{0.51}$	(Abrahamsson and Håkanson, 1998)
x	x	Abraha_Wlat	facteur quantifiant l'influence de la latitude sur la variabilité saisonnière (inter-mensuelle) de ce même débit	$[(\text{lat} - 35) / (70 - 35)]^{2.18}$	(Abrahamsson and Håkanson, 1998)
x	x	Abraha_qs	rapport entre la profondeur moyenne et le temps de résidence	$Z_{\text{moy}} / \text{Abraha\_TpsRes}$	
x		Alc	alcalinité	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	AreaA	surface de sédiment hors de portée de l'action mécanique des vagues et courants de surface pouvant générer une remise en suspension permanente ou temporaire des sédiments	$\text{SurfLac} * [(Z_{\text{max}} - D_{\text{crit}}) / (Z_{\text{max}} + D_{\text{crit}} * \exp(3. - Vd^{1.5}))]^{(0.5 / Vd)}$	(Håkanson et al., 2004)
x	x	BV_AltMOY	altitude moyenne du bassin versant	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	BV_Denivele	dénivelé sur le bassin versant	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	BV_PenteMOY	pente moyenne sur le bassin versant	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	Cont	distance à la côte la plus courte	-	
x	x	DLbv	facteur de forme du BV	$\text{PerimBV} / (2 * (3.1415 * \text{SurfBV})^{0.5})$	
x	x	DLlac	facteur de forme du lac	$\text{PerimLac} / (2 * (3.1415 * \text{SurfLac})^{0.5})$	(Hutchinson, 1957)
x	x	DRhak	« dynamic ratio » turbulences potentielles dans le lac	$(\text{SurfLac} / 1000000)^{0.5} / Z_{\text{moy}}$	(Håkanson and Bryhn, 2008)
x	x	Dcrit	profondeur dite « critique » qui marque la limite d'action des vagues et des courants de surface	Si $D_{\text{critb}} > Z_{\text{max}}$ alors on prend $Z_{\text{max}}$	
x	x	Dcrit2	profondeur de la limite entre les deux couches les plus basses	Si $D_{\text{crit2b}} > Z_{\text{max}}$ alors on prend $Z_{\text{max}}$	
x	x	Dcrit2Prop		$(Z_{\text{max}} - D_{\text{crit2}}) / Z_{\text{max}}$	
x	x	Dcrit2Prop2		$(Z_{\text{max}} - D_{\text{crit2}}) / (Z_{\text{max}} - D_{\text{crit}})$	
x	x	Dcrit2b	profondeur de la limite entre les deux couches les plus basses	$6.70 * Z_{\text{max}}^{**1.23} / (21.4 + \text{SurfLac}^{ac^{0.5}})$	(Bryhn, 2009)

x	x	DcritProp	proportion de la profondeur du plan d'eau qui se trouve en dessous de la profondeur « critique »	$(Z_{max}-D_{crit})/Z_{max}$	
x	x	DcritRap		$D_{crit2}/D_{crit}$	
x	x	Dcritb	profondeur dite « critique » qui marque la limite d'action des vagues et des courants de surface	$45.7*SurfLac^{0.5}/(21.4+SurfLac^{0.5})$	(Håkanson et al., 2004)
x	x	Drel	profondeur relative	$(Z_{max}*(3.1415/SurfLac)^{0.5})/20.$	(Kõiv et al., 2010)
x	x	Ds	dénivelé spécifique	$Ig/SurfLac^{0.5}$	Bulletin Fao D'irrigation Et De Drainage n°54
x	x	GSemp1	durée empirique de la saison de croissance	$(-0.058*lat^2.+0.549*lat+365)$	(Hakanson and Boulion, 2001)
x	x	GSemp1adj	durée empirique de la saison de croissance corrigée de l'effet de l'altitude	$(-0.058*(latAdj^2)+0.549*latAdj+365)$	(Hakanson and Boulion, 2001)
x	x	HW	forêts de feuillus sur le bassin versant ou zones tampon à 200+ 500 et 100m des berges+ exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	$311+(313/2)$	CLC 2006
x	x	Hd	paramètre décrivant le rapport entre le profil bathymétrique et un cône	formule différente selon Vd (Danis et 2011)	(Johansson et al., 2007)
x	x	IBP	"Index of basin permanence" indice morphométrique entre le volume du lac et son périmètre	$Vol/PerimLac$	(Moses et al., 2011)
x	x	IHGRMean10yrs_SAFRAN	moyenne annuelle de l'indice d'humidité des sols entre 1990-2009 selon le modèle SAFRAN	-	(Vidal et al., 2009)
x	x	ITSS	indice topographique de saturation des sols	$\ln(SurfDrain/\tan(BV\_PenteMOY*3.1415/180))$	(Carignan et al., 2007)
x	x	Ig	indice global de pente caractérisant le relief de la cuvette	$Z_{max}/Lr$	Bulletin Fao D'irrigation Et De Drainage n°54
x	x	Kcond	coefficient pour prédire la conductivité	$SurfLac/(Vol/10^6)*Loieau_TpsRes$	<a href="http://www.fao.org/docrep/005/AC676B/AC676B04.htm">http://www.fao.org/docrep/005/AC676B/AC676B04.htm</a>
x	x	Loieau_Q	somme des débits simulés moyens annuels issus de tous les tributaires à un plan d'eau selon le modèle Loieau. Moyennes sur la période 2000-2007	-	(Folton and Lavabre, 2007)
x	x	Loieau_TpsRes	estimation du temps de séjour de l'eau calculé par le rapport entre le volume du plan d'eau et le débit entrant estimé par le modèle Loieau	$Vol/Loieau\_Q$	(Pourriot and Meybeck, 1995)
x	x	Loieau_WQ	facteur quantifiant l'influence du débit moyen annuel d'une rivière sur la variabilité saisonnière (inter-mensuelle) de ce même débit	$(Loieau\_Q/5000)^{0.22}$	
x	x	Loieau_qs	rapport entre la profondeur moyenne et le temps de résidence	$Z_{moy}/Loieau\_TpsRes$	

Action 36

x	x	Lr	longueur du rectangle qui a la même superficie+ le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que la cuvette lacustre*	$DLlac*((SurLac)^{0.5}/1.128)*(1+(1-(1.128/DLlac)^2))^{0.5}$	Bulletin Fao D'irrigation Et De Drainage n°54
x	x	MAET	température moyenne annuelle de l'épilimnion estimée à partir de la situation géographique définie par la latitude+ l'altitude et la continentalité	$44-((750/(90-lat^{0.85}))^{1.29}-0.1*alt^{0.5}-0.25*(Cont^{0.9}+500)^{0.52}$	(Hakanson and Boulion, 2001)
x	x	MAET_Straskraba	température moyenne annuelle de l'épilimnion	$28.12-0.34*(lat-3.4)$	(Hakanson and Boulion, 2001)
x	x	MMF	facteur morphométrique décrivant la couche de mélange d'un plan d'eau méromictique	$[(0.1466*Zmax^{1.23})/(SurfLac^{0.5})]-1$	(Bryhn, 2009)
x	x	PerimBV	périmètre du bassin versant	-	(Heyd et al., 2012)
x	x	PerimLAC	périmètre du lac	-	(Alleaume and Lanoiselée, 2010)
x	x	PrecipMean10yrs_SAFRAN	amplitude annuelle moyenne des précipitations entre 1990-2009 selon le modèle SAFRAN	-	(Vidal et al., 2009)
x	x	PrimP	estimation de la production primaire annuelle	$10^{(5.8-1.86*(90/(90-lat))^{0.5})}$	(Hakanson and Boulion, 2001)
x	x	PrimPadj	estimation de la production primaire annuelle corrigée de l'effet de l'altitude	$10^{(5.8-1.86*(90/(90-latAdj))^{0.5})}$	
x	x	RapVolCrit		$(Vol-[AreaA*Dcrit+(SurfLac-AreaA)*(Dcrit/3*Vd)]/AreaA*Dcrit+(SurfLac-AreaA)*(Dcrit/3*Vd)$	
x	x	RapVolzThPompilio	Volume au dessus de la thermocline	$=Vbelow/(Vol-Vbelow)$	Vbelow = équation n°13 in (Johansson et al., 2007)
x	x	RapzEpiDavies2	rapport entre la profondeur de l'épilimnion calculé selon Davies et Collez et la profondeur maximale	$zEpiDavies2/Zmax$	
x	x	RapzThDavies2	rapport entre la profondeur de la thermocline calculée selon Davies collez et la profondeur maximale	$zThDavies2/Zmax$	
x	x	RapzThPomp2	rapport entre la profondeur de la thermocline calculée selon Pompilio et al et la profondeur maximale	$zThPompMean2/Zmax$	
x	x	SW	forêts de conifères sur le bassin versant ou zones tampon à 200+ 500 et 100m des berges+ exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	$312+(313/2)$	CLC 2006
x	x	SiO2b	moyenne de la concentration en dioxyde de silicium entre la zone euphotique et le fond	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	Surf1000m	surface de la zone tampon à 1000 m des berges	-	MNT BD Alti IGN 50m
x	x	Surf200m	surface de la zone tampon à 200 m des berges	-	MNT BD Alti IGN 50m
x	x	Surf500m	surface de la zone tampon à 500 m des berges	-	MNT BD Alti IGN 50m



x	x	SurfBV	surface du bassin versant	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	SurfDrain	surface de drainage	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	SurfDrainProp	rapport entre la surface de drainage et celle du BV	SurfDrain/SurfBV	
x	x	SurfHorsFr	surface du bassin versant hors de France	-	protocole Bavela (Heyd et al., 2012)
x	x	SurfLAC	surface du lac	-	(Alleaume and Lanoiselée, 2010)
x		SurfLACObsMax	surface maximale du lac observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x		SurfLACObsMean	surface moyenne du lac observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	SurfLacProp	rapport entre la surface du lac et celle du BV	SurfLac/SurfBV	
x	x	TairAmplMean_SAFRAN	amplitude annuelle moyenne de la température de l'air entre 1990-2009 selon le modèle SAFRAN	-	(Vidal et al., 2009)
x	x	TairMean10yrs_SAFRAN	moyenne annuelle de la de la température de l'air entre 1990-2009 selon le modèle SAFRAN	-	(Vidal et al., 2009)
		TpsSejourMoyP la	temps de séjour moyen	-	Agence de l'Eau
x	x	Vd	facteur de forme de la cuvette	3*Zmoy/Zmax	(Håkanson, 2005)
x	x	VentMean10yrs_SAFRAN	moyenne annuelle de la vitesse du vent entre 1990-2009 selon le modèle SAFRAN	-	(Vidal et al., 2009)
x	x	Vol	volume du lac	-	(Alleaume and Lanoiselée, 2010)
x		VolObsMax	volume maximal du lac observé lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x		VolObsMean	volume moyen du lac observé lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	W	forêts sur le bassin versant ou zones tampon à 200+ 500 et 100m des berges+ exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	311+312+313	CLC 2006
x	x	X.COURS500	proportion de cours d'eau à 500m des berges du lac	-	protocole Corila (Alleaume and Argillier, 2012)
x	x	X.VEG500	proportion de végétation arborée à 500m des berges du lac	-	protocole Corila (Alleaume and Argillier, 2012)
x	x	YDR	modérateur qui exprime comment les turbulences pourrait influencer la vitesse de sédimentation	0.26 / Drhak	(Håkanson and Bryhn, 2008)
x	x	ZH	zones humides sur le bassin versant ou zones tampon à 200+ 500 et 100m des berges+ exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	411+412+421+423+511+523	CLC 2006
x	x	Zmax	profondeur maximale	-	(Alleaume and Lanoiselée, 2010)

x		ZmaxObsMax	valeur maximale de la profondeur maximale observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x		ZmaxObsMean	valeur moyenne de la profondeur maximale observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	Zmoy	profondeur moyenne	-	(Alleaume and Lanoiselée, 2010)
x	x	ZmoyHypo	profondeur moyenne de l'hypolimnion	$(Z_{max}-D_{crit})/2$	
x		ZmoyObsMax	valeur maximale de la profondeur moyenne observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x		ZmoyObsMean	valeur moyenne de la profondeur moyenne observée lors des relevés physico-chimiques	-	Réseaux de suivi (RCS et RCO)
x	x	alt	altitude du lac	-	réseau NGF-IGN69
	x	calcaire	pourcentage sur BV de roches mères à dominante calcaire	-	Base de Données des Terres (INRA) et Info Terre (BRGM)
x	x	f_Dm	fonction de pondération empiriquement lié à l'effet d'amortissement dû au volume et à la surface du plan d'eau sur la saisonnalité thermique de l'eau en profondeur	$0.5/(1.1/(Z_{moy}+0.1)+0.2)$	(Ottooson and Hakanson, 1997)
x	x	f_MAET_V	fonction de pondération empiriquement lié à l'effet d'amortissement dû au volume du plan d'eau sur la saisonnalité thermique de l'eau en surface	$(MAET*(Vol)^{0.1})/6$	(Ottooson and Hakanson, 1997)
x	x	lat	latitude	-	BD Carthage
x	x	latAdj	latitude corrigée de l'effet de l'altitude	$lat+(ax/100)*alt$ avec ax un facteur de conversion de l'altitude en degrés de latitude lewis 1983	(Nurnberg, 1988)
x	x	lat_T		$(90/(90-lat))^{0.5}$	
x	x	lon	longitude	-	BD Carthage
	x	silice	pourcentage sur le bassin versant de roches mères à dominante siliceuse	-	Base de Données des Terres (INRA) et Info Terre (BRGM)
x	x	zEpiDavies2	estimation de la profondeur de l'épilimnion	$7.69*(SurfLac^{0.5})^{0.463}$	(Davies-Colley, 1988)
x	x	zThDavies2	estimation de la profondeur de la thermocline	$9.52*(SurfLac^{0.5})^{0.425}$	(Davies-Colley, 1988)
x	x	zThPompMean2	moyenne des 3 estimations mensuelles de la profondeur de la thermocline durant l'été	formule différente selon DLac	(Pompilio et al., 1996)
x	x	zThPompilioMean	Si la profondeur de la thermocline est supérieure à Zmax alors on utilise Zmax	-	

**Annexe 3 : Détails du calcul du Lake Habitat Quality Assessment**

Sous scores	Variables	Paramètres et calcul	note 0	note 1	note 2	note 3	note 4	note finale
<b>Riparian</b>	structure de la végétation, complexité	nombre PO où plusieurs strates sont présentes	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	somme de chaque variable / 20
	longévité de la végétation	nombre PO où recouvrement des arbres Ø > 0,3 m > 10% (classe 2 et +)	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	recouvrement des occupations des sols naturels	nombre PO où le milieu est naturel	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	diversité des occupations des sols naturels	nombre de milieux naturels recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	diversité de substrats de haut de berge	nombre de substrats recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	présence de talus de terre et sable > 1m	nombre PO avec h > 1m et substrats	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	PO avec ligne de dépôts	nombre de PO présentant une ligne de débris	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	proportion de berges naturelles	nombre de PO avec substrat naturel	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	diversité des berges naturelles	nombre de substrats recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	proportion de grèves naturelles	nombre de PO avec substrat naturel	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
<b>Shore</b>	diversité des substrats de grève	nombre de substrats recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	somme de chaque variable / 24
	variations de profondeur (coefficient de variation)	coefficient de variation (moyenne / écart type) de profondeur rapporté à 10 m sur les 10 PO	0	> 25	> 50	> 75	> 75	
	recouvrement des substrats naturels	nombre de PO avec substrat littoral	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	diversité des substrats littoraux naturels	nombre de substrats littoraux naturels recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	recouvrement des macrophytes	moyenne du recouvrement des macrophytes sur les 10 PO par classe	0	1	2	3	4	
	extension littorale des macrophytes	macrophytes sur les 10 PO par classe	0	1 à 3	4 à 6	7 à 8	9 et 10	
	diversité des macrophytes	nombre de types de macrophytes recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	recouvrement des habitats piscicoles	moyenne du recouvrement des habitats sur les 10 PO par classe	0	1	2	3	4	
	diversité des habitats littoraux	nombre de types d'habitats recensés sur les 10 PO	0	1	2	3	≥ 4	
	<b>variables</b>	<b>paramètres et calcul</b>	<b>note 0</b>	<b>note 5</b>	<b>note 10</b>	<b>note 15</b>	<b>note 20</b>	
diversité des habitats naturels	nombre d'habitats différents recensés sur les 10 sections	0	1	2	3	4	somme de chaque variable / 36	
<b>variables</b>	<b>paramètres et calcul</b>	<b>note 0</b>	<b>note 2</b>	<b>note 5</b>	<b>note 10</b>			
nombre d'îles	nombre d'îles	0	1	2 à 4	≥ 5			
<b>variables</b>	<b>paramètres et calcul</b>	<b>note 0</b>	<b>note 2</b>	<b>note 4</b>	<b>note 6</b>			
nombre d'îles deltaïques	nombre de types d'îles deltaïques (à l'exclusion des dépôts de sable et limon non végétalisés)	0	1	2	3			

score max LHQA : 112

 PO : point d'observation  
 Le score du LHQA est égal à la somme des notes de chaque variable des sous scores

**Annexe 4 : Liste des pressions utilisées dans cette étude d'après (Danis and Argillier, 2011; Danis and Argillier, 2013; Danis et al., 2012)**

Code	Définition	Source
A	surface agricole sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 1000m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	codes 211, 221, 222, 223, 231, 242, 243 et 244 de CLC 2006
AI	surfaces en agriculture intensive sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 100m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	codes 211, 221, 222, 223, 242 de CLC2006
DP	densité de population sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 100m des berges, exprimée en milliers d'habitants, en habitants/km <sup>2</sup> et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	Corine Land Cover 2000
LUI	« Land Use Index » / indice d'utilisation des sols : % U+0.5 * %terres cultivées	(Hering et al., 2006b)
ONSN	occupation naturelle et semi-naturelle sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 100m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	codes311, 312, 313, 321, 322, 323, 324, 331, 332, 333, 334, 335, 411, 412, 421, 423, 511, 523 de CLC 2006
ONSNAE	occupation naturelle et semi-naturelle avec l'agriculture extensive sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 100m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	codes231, 243, 244, 311, 312, 313, 321, 322, 323, 324, 331, 332, 333, 334, 335, 411, 412, 421, 423, 511, 523 de CLC 2006
RR	réseau routier sur les zones tampon à 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 et 500m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface des zones tampon (soit 40 mesures)	BD Topo
RRF	réseau routier et ferré sur les zones tampon à 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 et 500m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface des zones tampon (soit 40 mesures)	BD Topo
SurplusN	surplus en azote sur le bassin versant, exprimé en poids et pondéré par le volume et la surface du lac (soit 3 mesures)	modèle Nopolu (Commissariat Général au Développement Durable, 2010)
U	surface urbanisée sur le bassin versant ou zones tampon à 200, 500 et 1000m des berges, exprimée en surface et pondérée par le volume et la surface du lac et la surface du bassin versant ou de la zone tampon (soit 16 mesures)	codes 111, 112, 121, 122, 123, 124, 131, 132, 133, 141, 142 de CLC 2006

**Annexe 5 : Détails du calcul du Lake Habitat Modification Score**

Sous scores	Variables	Paramètres et calcul	note 0	note 2	note 4	note 6	note 8	note finale
<b>Shore Zone Modification</b>	% rive en génie civil		< 10 %	10 à 29 %	30 à 49 %	50 à 74 %	> 75 %	note de la variable la plus déclassante
	protections des berges	nombre PO avec berge modifiée	0 ou 1	2	3 ou 4	5 à 7	≥ 8	
	affouillements	nombre PO avec berge modifiée		≥ 3				
<b>Shore Zone Intensive Use</b>	% rive avec couverture non naturelle		< 10 %	10 à 29 %	30 à 49 %	50 à 74 %	> 75 %	note de la variable la plus déclassante
	PO avec couvert non naturel	nombre PO avec une occupation des sols non naturelle	0 ou 1	2	3 ou 4	5 à 7	≥ 8	
<b>In Lake Use</b>	pressions/activités sur le lac	nombre de pressions présentes	0	1	2	3	≥ 3	note la plus déclassante
	hydrologie - structures hydrauliques	présence d'un barrage sans passe à poissons					1	
<b>Hydrology</b>	hydrologie - structures hydrauliques	nombre de structures hydrauliques recensées	0 ou 1	2	≥ 3			note de la variable la plus déclassante
	hydrologie - retenue amont	si présence		1				
	hydrologie - usages	si usage principal = électricité ou protection contre inondations ou AEP (Adduction Eau Potable)				1		
	hydrologie - variations des niveaux d'eau	variation d'eau annuelle				≤ 1m	0,5 à 5 m	
	% rive érodée		< 25%	25 à 49 %	50 à 69 %	> 70 %		
<b>Sediment Regime</b>	PO avec dépôts	nombre PO avec sédimentation sur substrat		3 à 4	5 à 6			note de la variable la plus déclassante
	% recouvrement îles et dépôts	% recouvrement îles et dépôts	< 25 %	25 à 49 %	50 à 69 %	> 70 %		
<b>Nuisance Species</b>	présence de végétation nuisible/exotique	nombre PO où des espèces nuisibles ont été détectées en zone riparienne + nombre PO où des espèces nuisibles ont été détectées dans les milieux aquatiques	0 ou 1	2 ou 3	≥ 4			note la plus déclassante

score max LHMS : 42

PO : point d'observation

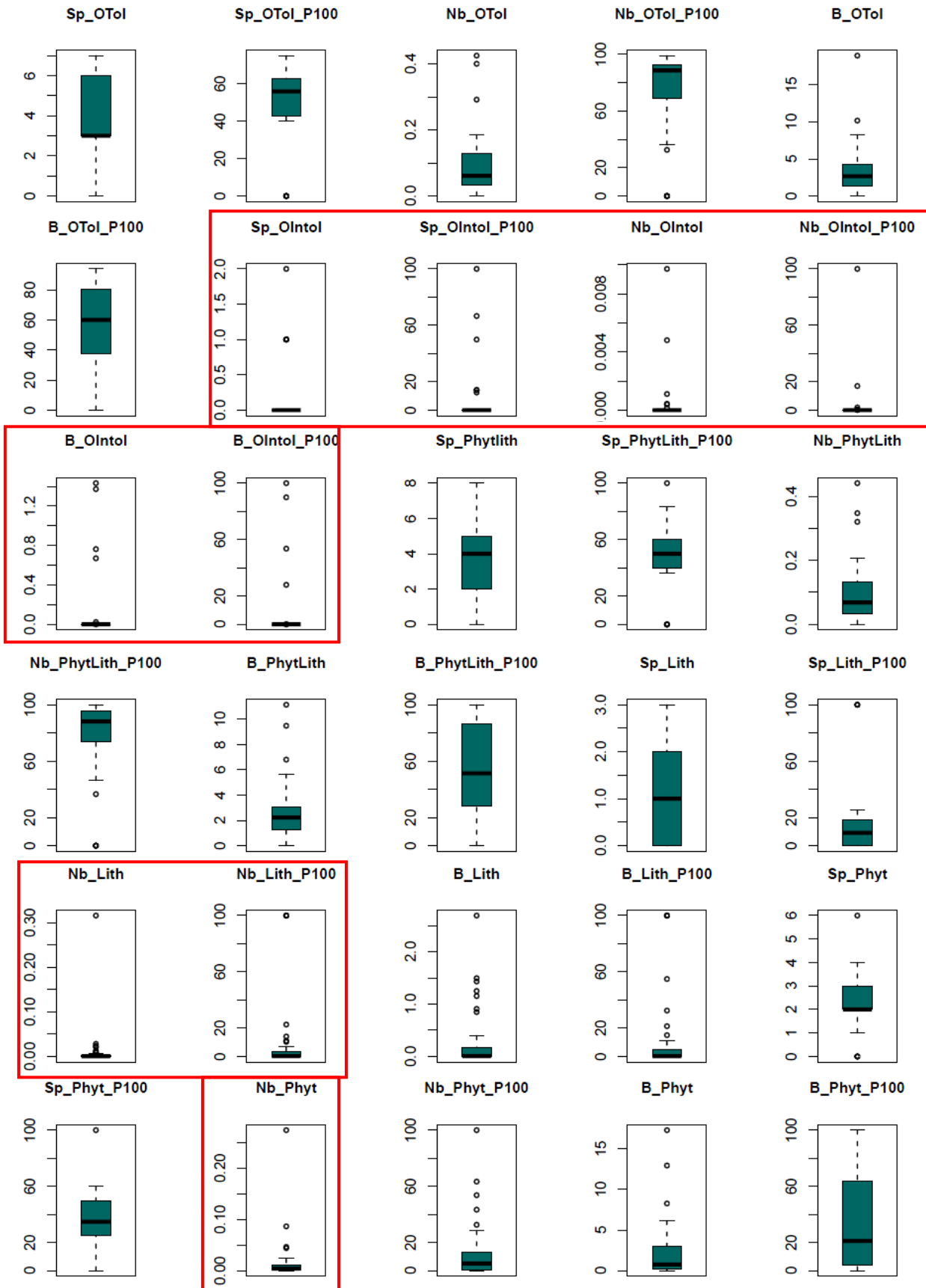
Le score du LHMS est égal à la somme des notes les plus déclassantes pour chaque sous score

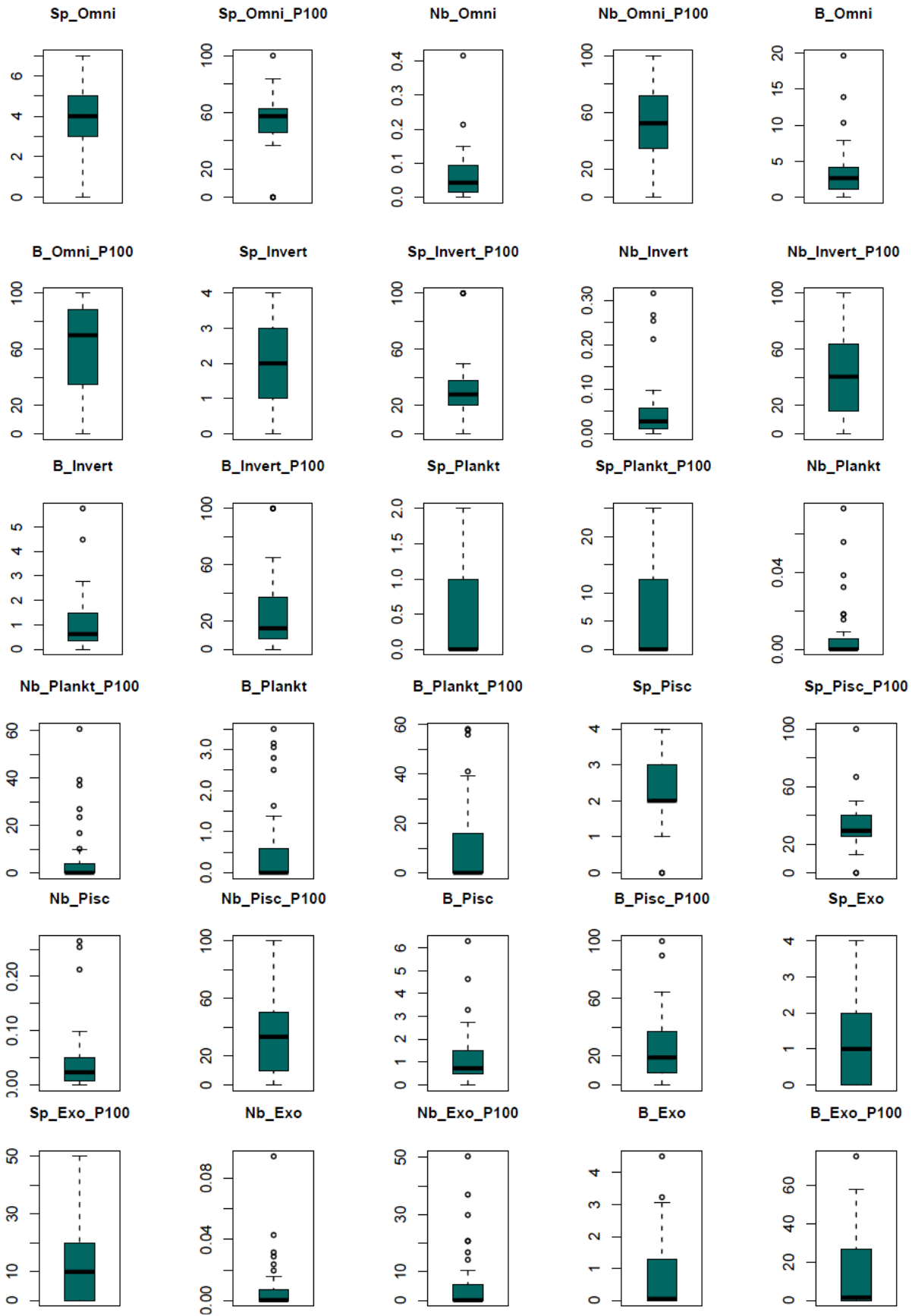
### Annexe 6 : Classification des 47 espèces piscicoles capturées sur les lacs nationaux en guildes fonctionnelle

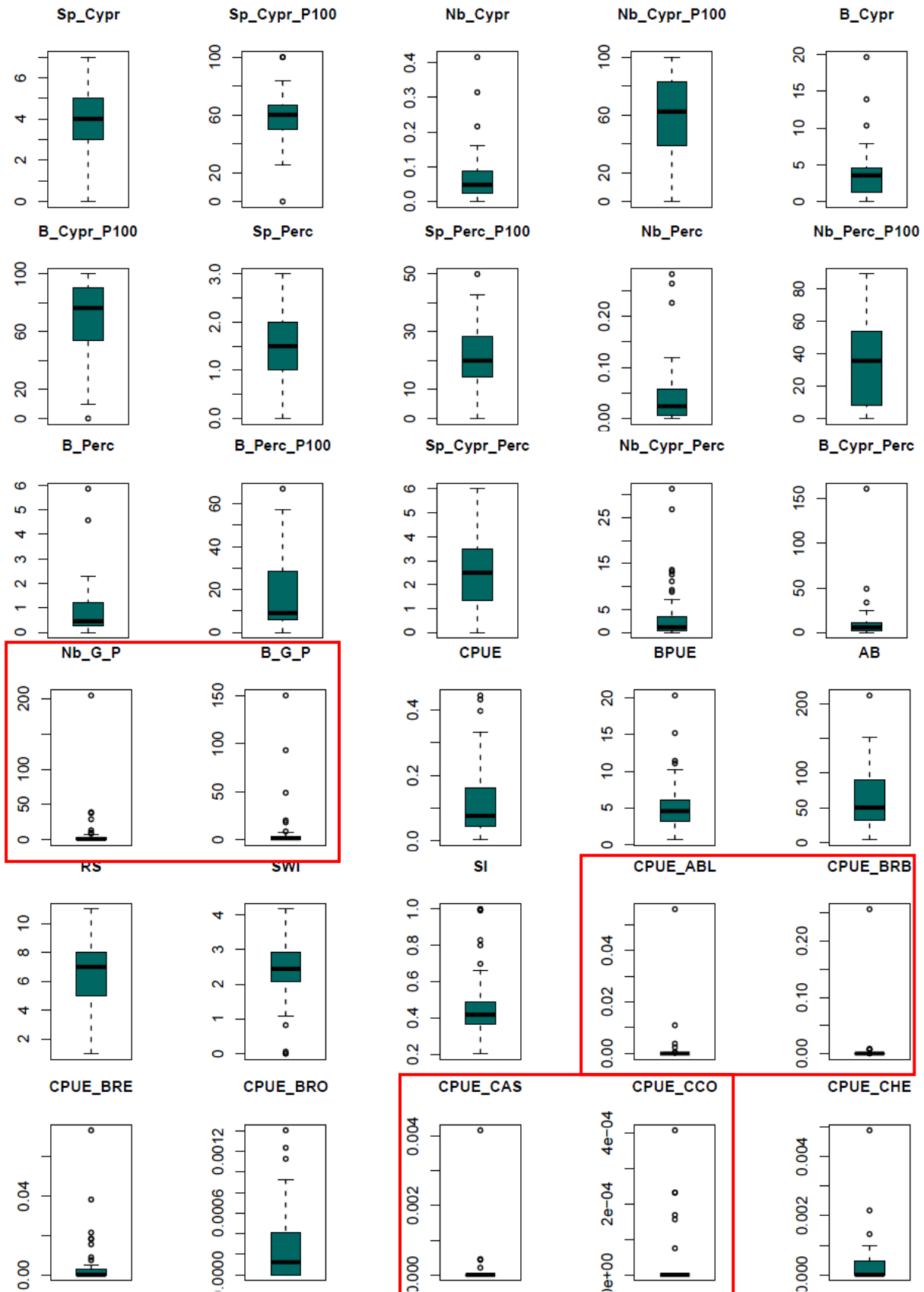
Nom Latin	Nom français	Code	Intolérance	Tolérance	Lithophile	Phytolithophile	Phytophile	Invertivore	Omnivore	Piscivore	Planktivore	Exotique
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
<i>Acipenser rupeus</i>	Sturlet	STL	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirlin	SPI	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
<i>Ameiurus melas</i>	Poisson chat	PCH	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	LOF	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Blicca bjoerkna</i>	Brème bordelière	BRB	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Carassius auratus</i>	Carassin doré	CAA	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
<i>Carassius carassius</i>	Carassin	CAS	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Chondrostoma toxostoma</i>	Horn	HOT	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Colitis faenia</i>	Loche de rivière	LOR	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
<i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
<i>Gambusia affinis</i>	Gambusie	GAM	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	EPI	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Gobio gobio</i>	Gonjon	GOU	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
<i>Gymnocephalus reninus</i>	Grémille	GRE	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Carpe argentée	CAR	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>Leuciscus delmeucius</i>	Able de Héckel	ABH	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
<i>Leuciscus idus</i>	Idé melanoïte	IDE	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	VAN	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
<i>Liza aurata</i>	Mulet doré	MUD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Liza ramada</i>	Mulet noir	MUP	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Lota lota</i>	Lote de rivière	LOT	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
<i>Micropterus salmoides</i>	Black bass à grande bouche	BBG	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Onchostichus mykiss</i>	Truite arc-en-ciel	TAC	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
<i>Parachanna toxostoma</i>	Toxostome	TOX	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche franche	PER	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Vairon	VAI	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
<i>Rhodeus amarus</i>	Bouvière	BOU	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
<i>Salapia fluviatilis</i>	Blennie	BLE	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Salmo trutta fario</i>	Truite fario	TRF	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
<i>Salvelinus namaycush</i>	Cristoromer	CRI	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
<i>Salvelinus umbla</i>	Ombre chevalier	OBL	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
<i>Sander inaequalis</i>	Sandre	SAN	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Silurus glanis</i>	Silure	SIL	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Squalius cephalus</i>	Cherme	CHE	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Telestes souffia</i>	Blageon	BLN	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	OBR	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0

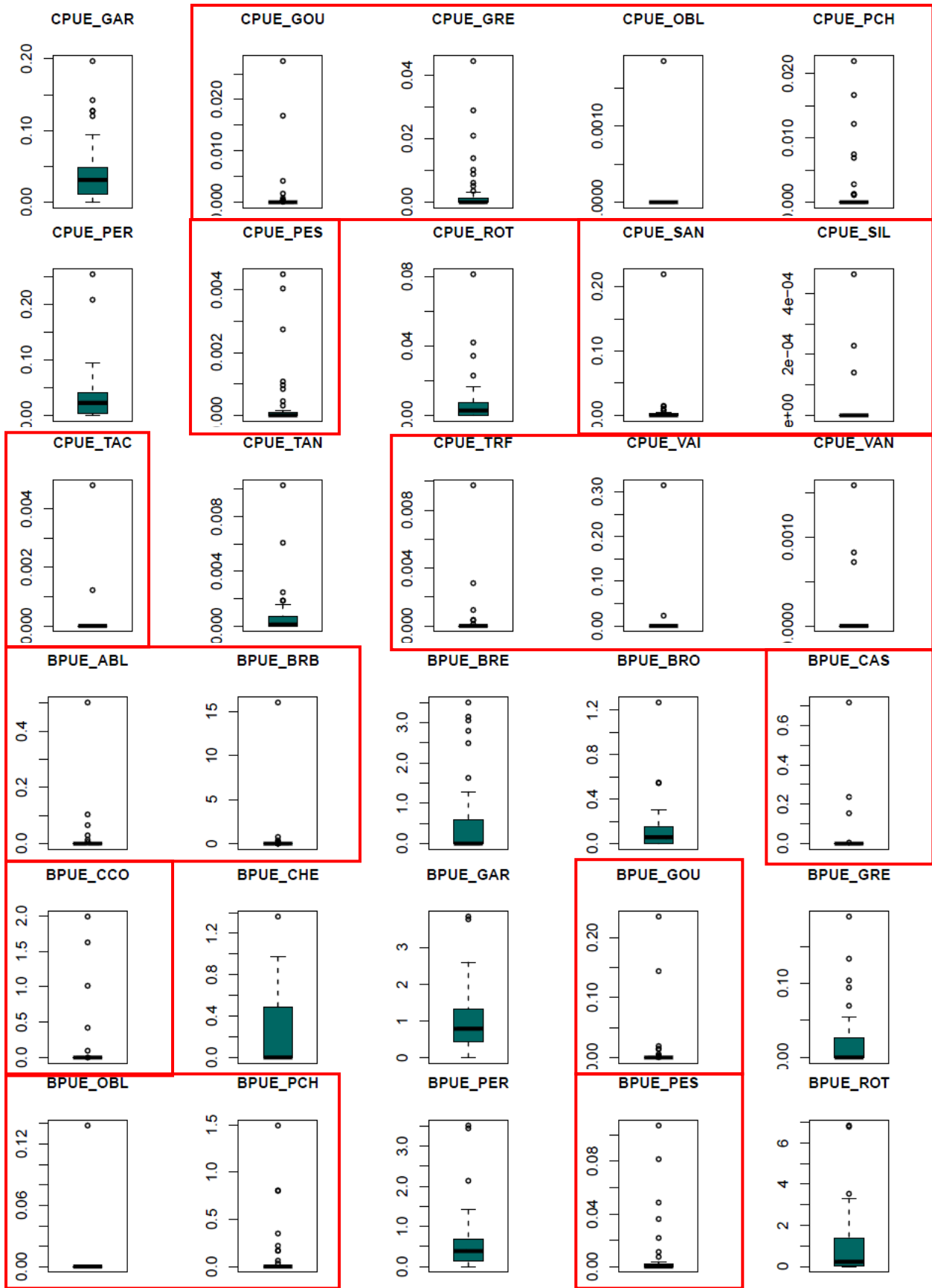


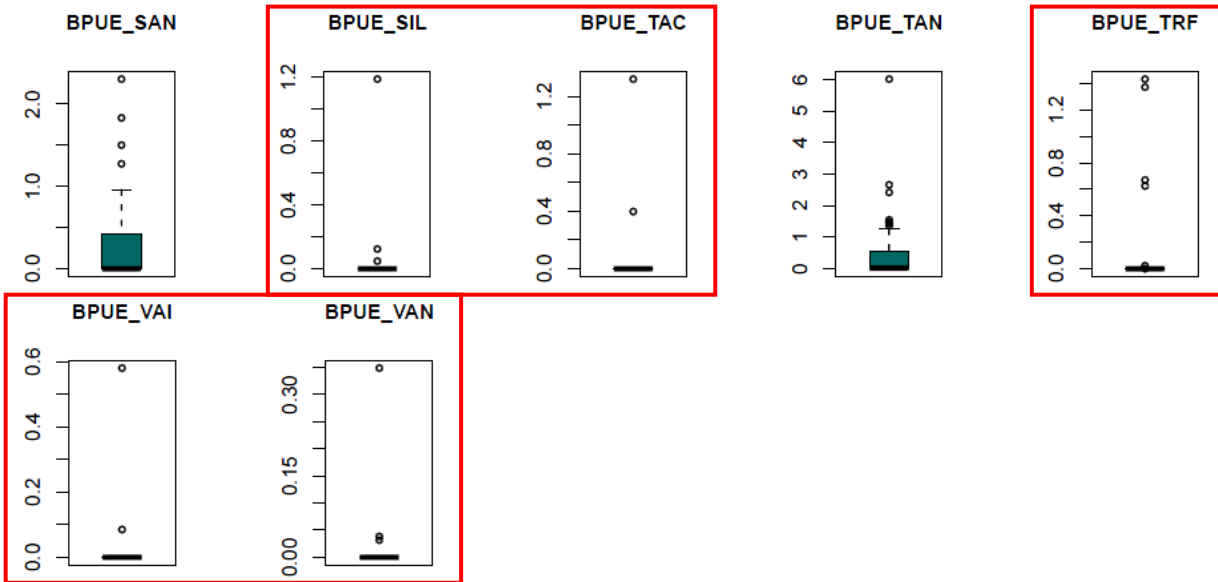
**Annexe 7 : Distribution des métriques piscicoles calculées sur les 42 lacs naturels DCE pêchés et échantillonnés avec le LHS (encadré en rouge, les métriques non utilisées lors de la modélisation)**



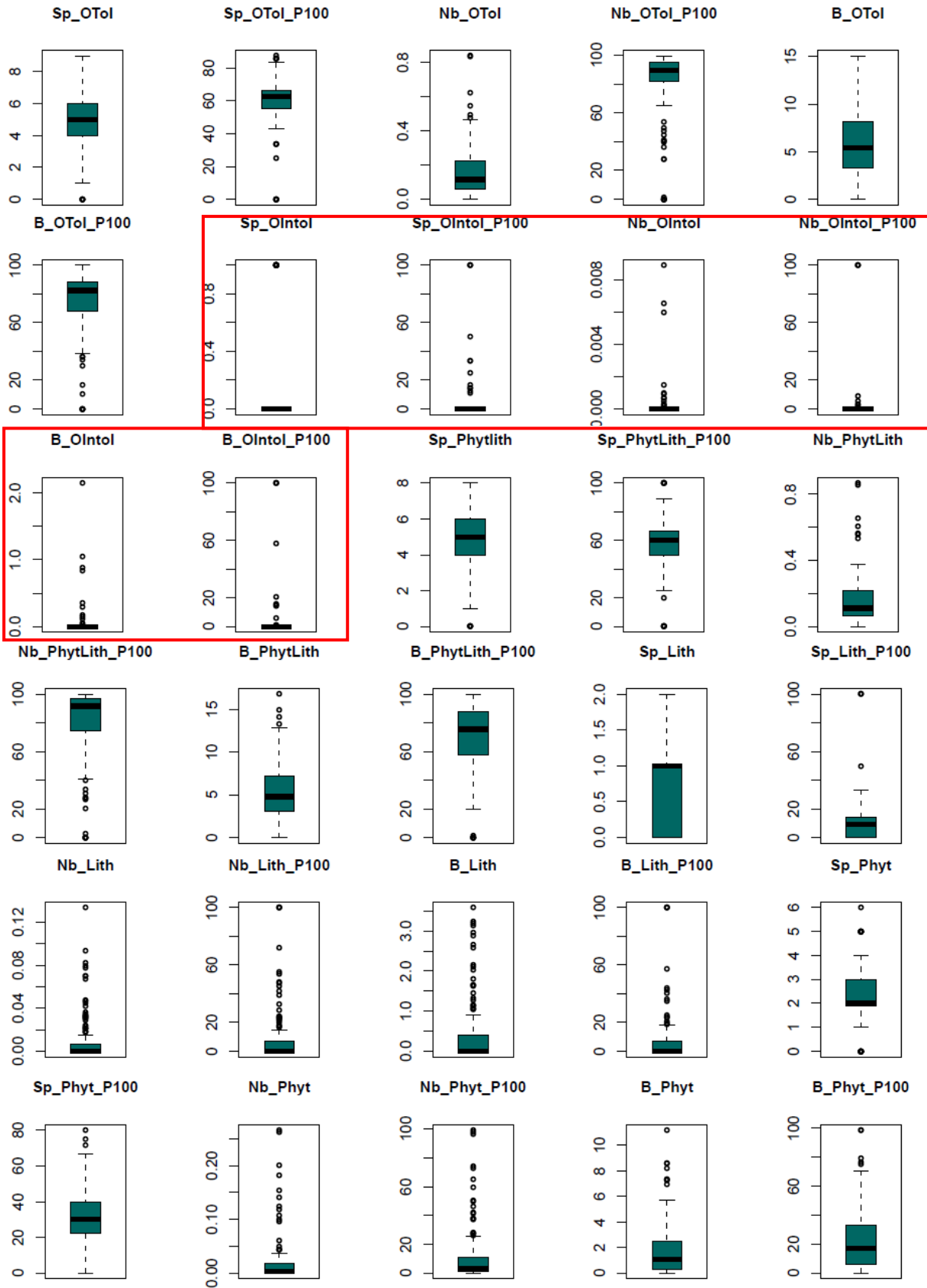




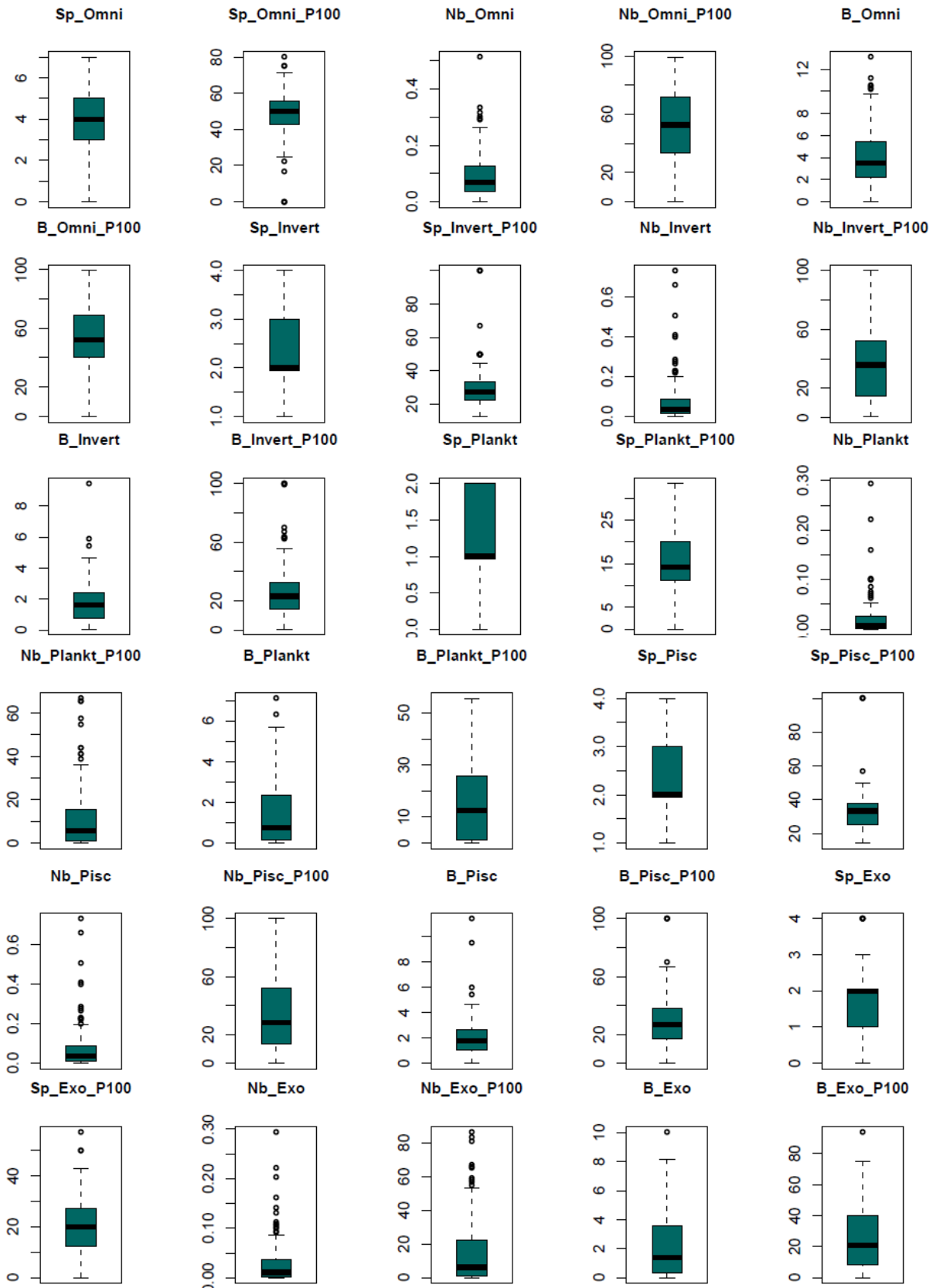


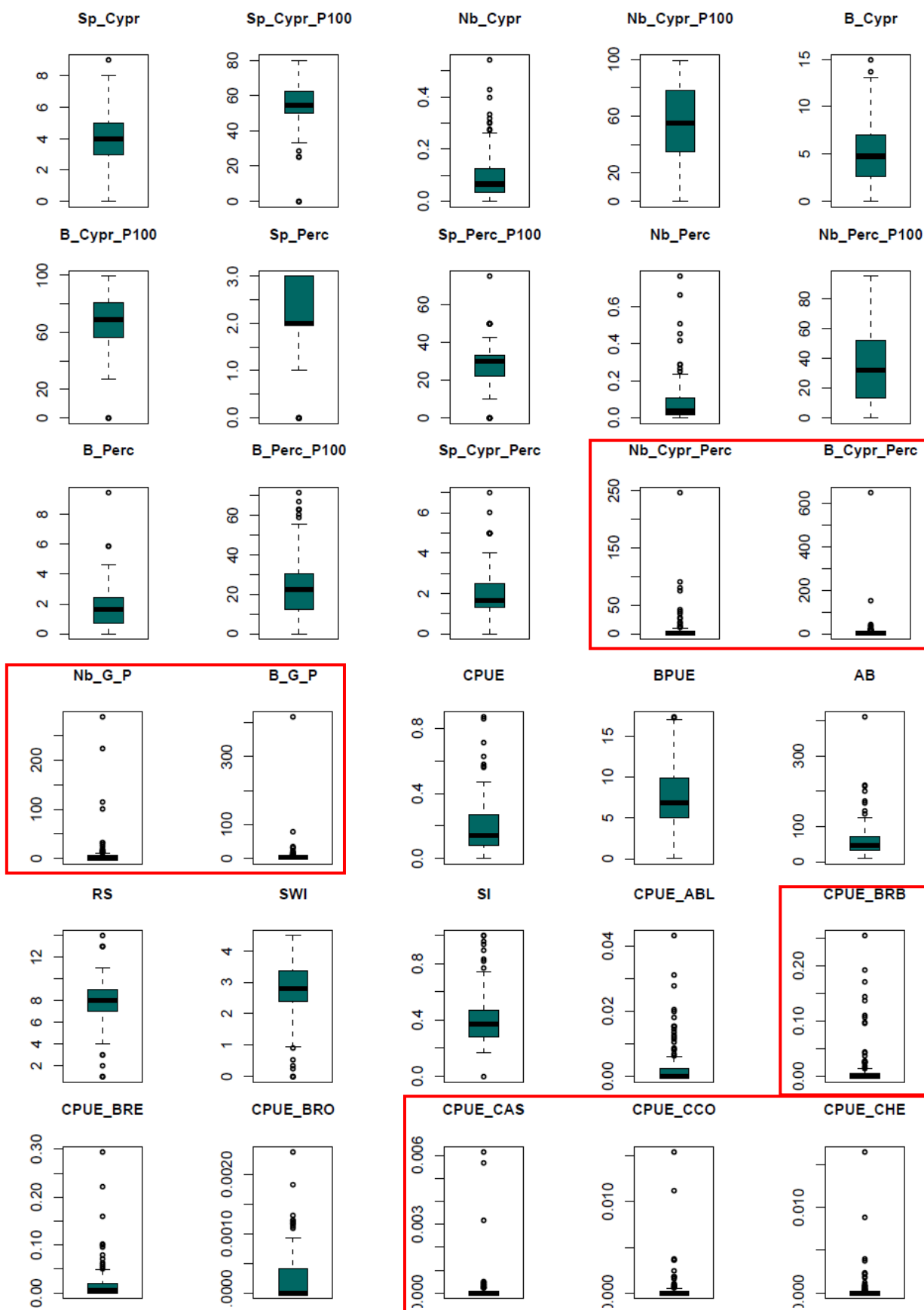


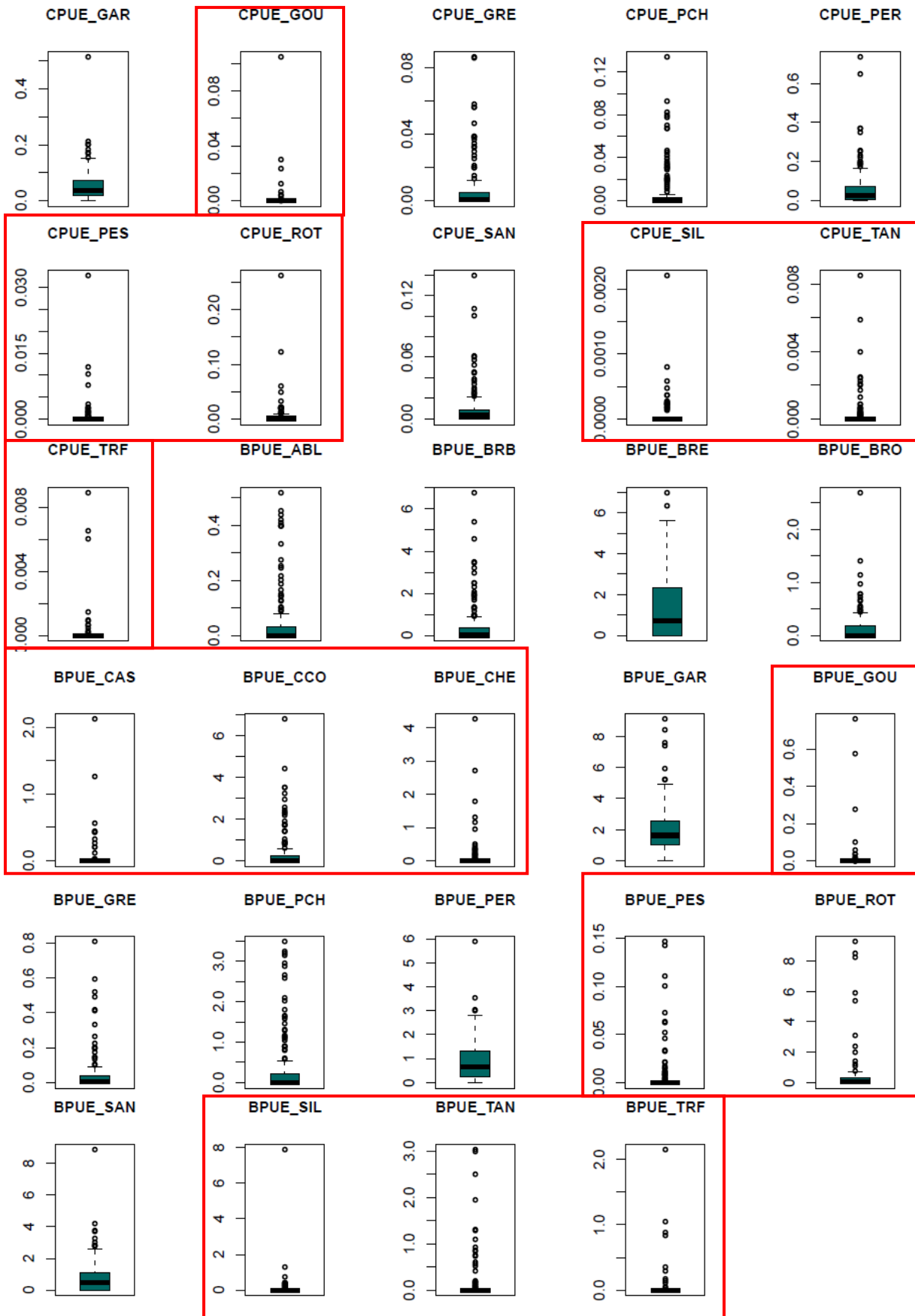
**Annexe 8 : Distribution des métriques piscicoles calculées sur les 145 retenues DCE pêchées et échantillonnées avec le LHS (encadré en rouge, les métriques non utilisées lors de la modélisation)**











**Onema**  
Hall C – Le Nadar  
5 square Félix Nadar  
94300 Vincennes  
01 45 14 36 00  
[www.onema.fr](http://www.onema.fr)

**Irstea**  
*Parc de Tourvoie*  
BP 44,  
92163 Antony cedex  
01 40 96 61 21  
[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)