

Incertitudes liées aux interactions de pressions

EFFET DES INTERACTIONS ENTRE LES PRESSIONS SUR LES METRIQUES CONSTITUTIVES DES
INDICATEURS IIL ET IIR

P. Miguet
M. Logez
C. Argillier

10/01/2019

Document final

Avec le soutien de

Contexte de programmation et de réalisation

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du programme scientifique et technique AQUAREF pour l'année 2018, au titre de l'action n°78 bis « Indicateur ichtyofaune de l'état écologique - analyse des incertitudes associées » du thème B « Mettre en œuvre les méthodes de bioindication dans la surveillance et l'évaluation ».

Auteurs :

Paul Miguet

Irstea, UR RECOVER, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea-INRA-USMB-ONCFS, "Ecosystèmes Lacustres", Centre d'Aix-en-Provence, 3275 route Cézanne, F-13182, Aix-en-Provence, France

paul.miguet@irstea.fr

Maxime Logez

Irstea, UR RECOVER, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea-INRA-USMB-ONCFS, "Ecosystèmes Lacustres", Centre d'Aix-en-Provence, 3275 route Cézanne, F-13182, Aix-en-Provence, France

maxime.logez@irstea.fr

Christine Argillier

Irstea, UR RECOVER, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea-INRA-USMB-ONCFS, "Ecosystèmes Lacustres", Centre d'Aix-en-Provence, 3275 route Cézanne, F-13182, Aix-en-Provence, France

christine.argillier@irstea.fr

Les correspondants

AFB : Jean Marc Baudoin

Chef du Pôle Recherche et Développement « Ecosystème Lacustre » (ECLA)

Centre Irstea d'Aix-en-Provence

Unité « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER)

3275 route de Cézanne - CS 40061 - 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Irstea : Christine Argillier

Centre Irstea d'Aix-en-Provence

Unité « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER)

3275 route de Cézanne - CS 40061 - 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Référence du document : Paul Miguet, Maxime Logez, Christine Argillier - Incertitudes liées aux interactions de pressions. Effet des interactions entre les pressions sur les métriques constitutives des indicateurs IIL et IIR - Rapport AQUAREF 2018 - 29 p.

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France</i>
Niveau géographique :	<i>National</i>
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Rapport</i>

1. INTRODUCTION	8
2. DONNEES ET METHODES.....	9
2.1. Données.....	10
2.1.1. Données biologiques	10
2.1.2. Données de l'environnement	11
2.2. Méthodes	14
3. RESULTATS	17
4. DISCUSSION	21
5. GLOSSAIRE	24
6. SIGLES & ABREVIATIONS.....	25
7. BIBLIOGRAPHIE.....	26
8. TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	29

RESUME

Des indicateurs basés sur les poissons et répondant à l'eutrophisation ont été développés pour évaluer l'état ou le potentiel écologique des plans d'eau : l'indice ichtyofaune lacustre pour les lacs naturels (IIL) et l'indice ichtyofaune pour les retenues (IIR). Ces indices répondent à la pression d'eutrophisation uniquement, et les modèles statistiques à la base de la construction de ces indices ne prennent pas en compte les interactions entre les différentes pressions pouvant influencer l'écosystème et les communautés. Dans ce contexte, nous étudions ici l'influence de trois pressions (eutrophisation, augmentation de la température de l'eau, prolifération des espèces non-natives) et de leurs interactions sur les métriques intervenant dans la définition des indices IIL et IIR, et les conséquences possibles pour l'évaluation.

Le principe de l'étude consiste à modéliser les métriques utilisées pour définir chacun des indices en utilisant les variables de l'environnement et de pression par des modèles linéaires (GLMs et *model averaging*) intégrant des interactions entre pressions d'une part, et des modèles équivalents n'intégrant pas d'interaction entre pressions d'autre part. On compare ensuite les résultats de ces deux modèles, et on interprète les effets des interactions de pressions dans les modèles qui les prennent en compte.

Nous montrons que ces trois pressions impactent les métriques de l'IIR dans les retenues et celles de l'IIL dans les lacs naturels. Deux types d'interactions de pressions ressortent statistiquement significatives : eutrophisation x espèces non-natives (1 cas) et eutrophisation x températures (2 cas). De plus les modèles avec interactions ont en général un pouvoir explicatif légèrement supérieur à celui des modèles sans interaction. L'étude montre que la prise en compte d'interactions entre pressions pourrait modifier légèrement l'évaluation de l'état écologique des lacs naturels et surtout du potentiel écologique des retenues.

Mots clés :

DCE ; eutrophisation ; espèces non-natives ; France ; incertitude ; indice ; état écologique ; interactions de pressions ; lac ; poisson ; température de l'eau

UNCERTAINTIES RELATED TO INTERACTIONS AMONG PRESSURES. EFFECTS OF INTERACTIONS AMONG PRESSURES ON METRICS CONSTITUTIVE OF IIL AND IIR INDICATORS
Paul Miguet, Maxime Logez, Christine Argillier

ABSTRACTS

Ecological indicators of lake quality based on fishes to evaluate ecological status or potential in response to eutrophication were defined: IIL for natural lakes and IIR for reservoirs. These indicators are based on statistical models that do not take into account interactions among the pressures that can influence lakes. We studied here the influence of three pressures (eutrophication, water temperature increase, non-native species proliferation) and their interactions on the metrics included in the definition of IIL and IIR, and the potential impact on evaluation.

We built statistical models (model averaging based on GLMs) of metrics used to define the two indicators, including environment and pressure predictors, with and without considering the interactions in the models. We then compare the models with and without interactions to evaluate the impact of adding interaction on evaluation.

We show an impact of the three pressures on metrics of the IIR in reservoirs and of the IIL in natural lakes. Two types of interactions among pressures are significant: eutrophication x non-native (1 case), and eutrophication x temperature (2 cases). Taking into account the interactions usually increased R^2 of the models in comparison with the models without interaction. Inclusion of interactions in the models could slightly modify the evaluation of the ecological status of natural lakes and of ecological potential of reservoirs.

Key-words:

Ecological status; ecological indicator; eutrophication; fish; France; lake; interaction among pressures; non-native species; uncertainty; water temperature; WFD

- **INCERTITUDES LIEES AUX INTERACTIONS DE PRESSIONS. EFFET DES INTERACTIONS ENTRE LES PRESSIONS SUR LES METRIQUES CONSTITUTIVES DES INDICATEURS IIL ET IIR**

1. INTRODUCTION

Deux indicateurs basés sur l'ichtyofaune ont été développés pour évaluer l'état, ou le potentiel écologique des plans d'eau tel que l'exige l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE 2000, directive 2000/60/CE, 23 octobre 2000). Ces indicateurs : l'indice ichtyofaune lacustre, IIL, pour les lacs naturels (Argillier et al. 2013, Logez et al. 2015) et l'indice ichtyofaune pour les retenues, IIR (Miguet et al. 2018b, 2018a) répondent à des facteurs de stress liés à l'eutrophisation des plans d'eau. Ces deux indicateurs se calculent à partir de métriques biologiques obtenues avec des données de pêche collectées selon un protocole d'échantillonnage aux filets maillants standardisé, NF EN 14757 (CEN 2015), et de variables de l'environnement caractéristiques des plans d'eau et de leur bassin versant.

Les deux indices sont constitués de trois métriques (caractéristiques du peuplement de poissons). L'IIL est défini pour une campagne de prélèvement par (i) la biomasse par unité d'effort de toutes les espèces de la communauté, et par les effectifs par unité d'effort (ii) de toutes les espèces de la communauté, et (iii) des espèces omnivores (Argillier et al. 2013, Logez et al. 2015).

L'IIR est défini pour une campagne de prélèvement par les biomasses par unité d'effort (i) de toutes les espèces de la communauté, (ii) des espèces planctivores et (iii) des espèces non-natives hors salmonidés (Miguet et al. 2018b, 2018a).

Ces deux indicateurs sont définis en considérant l'eutrophisation comme seule pression. Sur nos jeux de données, il n'a pas été possible d'identifier des métriques de l'ichtyofaune répondant significativement à l'altération de l'hydromorphologie des plans d'eau, sans doute du fait d'une mauvaise description de ces altérations et de la stratégie d'échantillonnage de l'ichtyofaune non optimale pour répondre à cet objectif (Bruçet et al. 2013).

Néanmoins, les milieux aquatiques en général et les plans d'eau en particulier subissent rarement une seule pression (Schinegger et al. 2012, Hering et al. 2015, Nöges et al. 2016). Bien que vraisemblablement les plus rependues, les altérations de la qualité chimique des plans d'eau traduisent souvent une dégradation plus générale du milieu et sont couplées à une altération des habitats de bordure et à la présence d'espèces non-natives introduites accidentellement ou volontairement (pour favoriser l'activité halieutique dans le cas de l'ichtyofaune par exemple). De plus, ces milieux subissent également les effets du changement climatique susceptibles d'engendrer une augmentation de la température et une modification des régimes de stratification (Danis 2003, Prats et al. 2018).

Les effets combinés des pressions sont généralement pris en compte comme s'additionnant les uns aux autres, l'impact total des pressions étant considéré comme la somme de leurs effets individuels. Ce constat est avéré dans le développement des indicateurs mais aussi dans la mise en œuvre des mesures d'atténuation ou de restauration des milieux. Pourtant, la littérature scientifique a pointé récemment le fait que ce modèle semble peu fréquent sur les systèmes écologiques en comparaison d'interactions antagonistes (effet

combiné plus faible que la somme des effets individuels) et synergiques (effet combiné supérieur à la somme des effets individuels) entre pressions sur les organismes (Folt et al. 1999, Crain et al. 2008, Piggott et al. 2015). Quelques analyses exploratoires réalisées sur l'ichtyofaune des différents types de milieux aquatiques d'Europe semblent confirmer ces résultats (Argillier et al. 2015).

L'effet des interactions de pressions dans l'évaluation de l'état/du potentiel écologique des écosystèmes par des indices est fonction du mode de construction de ces derniers. Cet effet sera très dépendant de la manière avec laquelle les valeurs dites de 'référence' sont établies. Ces valeurs servent de point de comparaison avec les valeurs observées dans les communautés. Elles sont généralement définies comme les valeurs observables dans un environnement donné en l'absence de pression ou pour des niveaux très faibles de pressions. Certains indices sont construits en référence à des données historiques observées (analyse de documents anciens) ou reconstruites par modélisation par exemple. En l'absence de telles données et de par un nombre insuffisant de plans d'eau peu ou pas perturbés, les valeurs de référence des indices IIL et IIR ont été estimées par la méthode dite 'hindcasting'. Pour la ou les variables de pressions, cette méthode fixe des valeurs qui sont cohérentes avec un faible niveau de pressions. Les valeurs de références sont établies en fonction de ces valeurs de pressions faibles ou nulles et des autres variables environnementales des plans d'eau.

La non prise en compte des interactions peut se traduire par une inadéquation des mesures de restauration qui peuvent, dans le cas d'effets non additifs des pressions, engendrer certaines réponses surprenantes des caractéristiques des écosystèmes (Paine et al. 1998).

Ainsi, On souhaite ici explorer les biais éventuels liés à la non-intégration de ces effets interactifs dans le développement des indices poissons utilisés pour évaluer l'état et le potentiel écologique des lacs naturels et des retenues respectivement. Plus précisément, notre objectif est de mesurer l'effet éventuel des interactions entre l'eutrophisation, la température de l'eau et l'abondance des espèces non-natives, sur les métriques incluses dans le calcul des indices IIL et IIR. Ces variables de stress peuvent varier naturellement entre les plans d'eau et au cours du temps indépendamment des activités humaines. Néanmoins, elles sont aussi impactées par l'anthropisation des écosystèmes et de leur bassin versant ainsi que par le changement climatique. Elles ont été identifiées comme susceptibles d'impacter les communautés de poissons lacustres à de nombreuses reprises (Matuszek and Beggs 1988, Rathert et al. 1999, Irz et al. 2008).

2. DONNEES ET METHODES

Le principe de la méthode développée est de modéliser les métriques constitutives des deux indices ichtyofaune IIL et IIR en utilisant des variables environnementales et de pressions comme variables explicatives de modèles linéaires. On calculera d'une part des modèles prenant en compte les interactions entre pressions, puis d'autre part des modèles ne prenant pas en compte les interactions entre pressions. Les deux types de modèles seront comparés pour conclure sur l'impact de la prise en compte ou non des interactions entre pressions sur l'évaluation de l'état et du potentiel écologique des écosystèmes.

2.1. DONNEES

2.1.1. Données biologiques

Les cinq métriques constitutives des indicateurs ichtyofaune ont été calculées à partir des données de 328 campagnes de prélèvement (220 lacs) disponibles dans la base de données PLAN_DEAU. Parmi ces données 255 campagnes concernent les retenues (181 lacs) et 73 campagnes concernent les lacs naturels (39 lacs). On calcule donc pour chaque campagne :

- *BPUE_ALL* (g/m²/12h) : biomasse par unité d'effort de toutes les espèces de la communauté ;
- *CPUE_ALL* (individus/m²/12h) : effectif par unité d'effort de toutes les espèces de la communauté ;
- *CPUE_OMNI* (individus/m²/12h) : effectif par unité d'effort des espèces omnivores ;
- *BPUE_PLAN* (g/m²/12h) : biomasse par unité d'effort de toutes les espèces de la communauté ;
- *BPUE_NN_NS* (g/m²/12h) : biomasse par unité d'effort des espèces non-natives en excluant les salmonidés.

On calcule également la métrique *BPUE_NN* (g/m²/12h), la biomasse par unité d'effort des espèces non-natives (sans exclure les salmonidés cette fois). Cette variable servira dans la suite pour définir un indicateur de la pression "abondance des espèces non-natives" (voir plus bas).

Les données de pêche utilisées concernent les captures des filets benthiques récoltées en application d'un protocole standardisé, NF EN 14757 (CEN 2015), classiquement utilisé en France pour la surveillance des plans d'eau.

Transformation et standardisation des métriques

Les six métriques ci-dessus ont été transformées à l'aide de la fonction logarithme népérien ($f(x) = \ln(1 + x)$), puis centrées par leur moyenne et réduites par leur écart-type sur les 328 campagnes.

Tableau 1. Distribution des valeurs des métriques (*m* : moyenne, *sd* : écart-type) avant-transformation (pour chaque type de plan d'eau où la métrique est utilisée), et après transformation ($f(x)=\ln(1+x)$) pour l'ensemble des plans d'eau (tous). Les valeurs après transformation pour tous les plans d'eau sont celles qui sont utilisées pour centrer et réduire les métriques après la transformation.

Plans d'eau	Avant transformation				Après transformation	
	LN		R		Tous	
Métrique	m	sd	m	sd	m	sd
BPUE_ALL	44.16	29	58.01	32.35	3.85	0.62
BPUE_PLAN	-	-	9.82	12.79	1.53	1.25
BPUE_NN_NS	-	-	11.1	13.21	1.68	1.23
CPUE_ALL	0.93	0.85	-	-	0.73	0.42
CPUE_OMNI	0.41	0.43	-	-	0.43	0.33
BPUE_NN	3.85	5.98	11.3	13.12	1.74	1.18

2.1.2. Données de l'environnement

Les données de l'environnement et de pression utilisées dans la suite comme variables explicatives des modèles des métriques présentées ci-dessus sont les suivantes :

- *SBV* : Surface du bassin versant (km²)
- *Pmax* : Profondeur maximale du plan d'eau (m)
- *Alti* : Altitude du plan d'eau (m)
- *Slac* : Superficie du plan d'eau (km²)
- *Tamp* : Amplitude annuelle de la température de l'air, moyenne sur 10 ans (°C)
- *TRT* : Temps de résidence (jour)
- *Marn* : Marnage (m)
- *Ig* : Indice global de pente (m/km)
- *Jour* : Jour de la campagne (jour), nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier de l'année en cours
- *TotalP* : Concentration en phosphore total dans la zone euphotique (µg/L)
- *CLC* : Proportion d'occupation non-naturelle du sol sur le bassin versant (entre 0 et 1, sans unité)
- *TEau10* : Température de l'eau moyenne dans la zone euphotique, moyenne sur 10 ans (°C)

Source des données et mode de calcul des variables :

- Les variables *SBV*, *Pmax*, *Alti*, *Slac*, *TRT* et *CLC* (estimation issue de la base de données CORINE Land Cover, version 2006 pour les campagnes réalisées jusqu'en 2010, et version 2012 pour les campagnes réalisées à partir de 2011) sont extraites de la base de données PLAN_DEAU.
- *Tamp* est calculée à partir des données journalières SAFRAN (Vidal et al. 2010) que l'on moyenne d'abord par mois. *Tamp* est la moyenne sur les 10 années précédant la campagne de la différence entre la moyenne de juillet et la moyenne de janvier.

- La variable *Marn* est déduite des profondeurs du plans d'eau enregistrées lors de la réalisation des mesures physico-chimiques sur les profils verticaux dans le cadre des suivis DCE, à raison de 4 profils répartis sur une année et répétés à une fréquence variable (souvent tous les 3 ans). *Marn* est la différence entre la profondeur maximale et la profondeur minimale mesurées sur l'ensemble des profils.
- *TotalP* est la valeur moyenne de la concentration en phosphore totale dans la zone euphotique dérivée des mesures de profils verticaux réalisées dans le cadre des suivis DCE, à raison de 4 profils répartis sur une année et répétés à une fréquence variable (souvent tous les 3 ans). *TotalP* est la moyenne des mesures des profils sur les 6 années précédant la campagne en incluant l'année de la campagne, lorsque des données sont disponibles pour cette période ; dans le cas contraire, la valeur utilisée est la moyenne des profils obtenus sur l'année la plus proche de l'année de pêche et pour laquelle des données sont disponibles.
- I_g : est calculée à partir de données de la base PLAN_DEAU d'après la formule suivante (FAO 1996 pp.4-5, Danis et al. 2012 p.19) : $I_g = \frac{P_{max}}{Lr}$, avec $Lr = Plac \cdot \frac{0,282}{1,128} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C}\right)^2}\right)$ et $K_C = 0,282 \cdot \frac{Plac}{\sqrt{Slac}}$, où P_{max} est la profondeur maximale du plan d'eau (m), $Plac$ est son périmètre (km) et $Slac$ est sa superficie (km²). Si $K_C < 1.128$, on fixe le terme sous la racine à 0. P_{max} , $Plac$ et $Slac$ sont issues de la base de données PLAN_DEAU.
- *TEau10* est une moyenne de la température de l'eau modélisée dans la zone euphotique par le modèle d'Ottosson dans chaque plan d'eau (Prats & Danis 2015). On moyenne les températures quotidiennes modélisées sur les 10 années précédant la campagne.

Transformation et standardisation des variables

Les 12 variables ci-dessus ont été transformées à l'aide des fonctions suivantes :

- Logarithme népérien ($f(x) = \ln(1 + x)$) pour *SBV*, *Pmax*, *Alti*, *Slac*, *TRT*, *Marn*, *Ig*, *TotalP*)
- Arcsinus de la racine carrée ($f(x) = \arcsin(\sqrt{x})$) pour *CLC*.
- Pas de transformation pour *Tamp*, *Jour*, *TEau10*

Ces variables ont été ensuite centrées par leur moyenne et réduites par leur écart-type, sur les 328 campagnes (Tableau 2).

Tableau 2. Distribution des valeurs des variables de l'environnement et de pression (*m* : moyenne, *sd* : écart-type) avant transformation sur les lacs naturels (LN) et sur les retenues (R), et après transformation ($f(x) = \ln(1 + x)$, $f(x) = \arcsin(\sqrt{x})$ ou pas de transformation) sur l'ensemble des plans d'eau (Tous). Les valeurs après transformation pour tous les plans d'eau sont celles qui sont utilisées pour centrer et réduire les variables après la transformation.

Plans d'eau	Avant transformation				Après transformation	
	LN		R		Tous	
Variabes	m	sd	m	sd	m	sd
<i>SBV</i>	370.17	1312.19	510.08	1174.05	4.39	1.88
<i>Pmax</i>	38.51	56.9	29.97	27.85	3.09	0.89
<i>Alti</i>	589.92	417.37	333.68	276.07	5.44	1.28
<i>Slac</i>	23.26	94.87	2.72	4.97	1.04	0.92
<i>Tamp</i>	16.2	1.92	15.52	1.77	15.67	1.82
<i>TRT</i>	993.48	1777.41	438.15	1387.86	4.91	1.71
<i>Marn</i>	3.39	2.28	7.82	8.05	1.75	0.76
<i>Ig</i>	12.97	24.93	4.72	4.38	1.66	0.75
<i>TEau10</i>	12.05	2.16	13.34	1.63	13.05	1.84
<i>Jour</i>	248.82	32.25	227.22	39.42	232.02	38.95
<i>R_NN</i>	-0.55	1	0.16	0.98	0	1.02
<i>TotalP</i>	26.72	30.37	46.63	53.72	3.41	0.80
<i>CLC</i>	0.32	0.21	0.56	0.31	0.79	0.37
<i>Press</i>	-0.61	0.61	0.17	1.02	0	0.87

Variabes de pression et de l'environnement dans les modèles

On considérera une variable pour représenter chacun des trois types de pression listés :

- Pression d'eutrophisation : *Press*, moyenne arithmétique de la concentration en phosphore total dans la zone euphotique *TotalP* et de la proportion non-naturelle d'occupation du sol *CLC* transformées et centrées-réduites. *Press* est ensuite centrée-réduite.
- Pression d'augmentation de la température : *TEau10* centrée et réduite
- Pression liée aux espèces non-natives : *R_NN*. La métrique *BPUE_NN* ne peut pas être utilisée directement car elle est trop corrélée à la métrique *BPUE_ALL*. On utilise donc la part de *BPUE_NN* qui ne dépend pas de *BPUE_ALL*. On définit ainsi la variable *R_NN* comme les résidus de la régression linéaire de la métrique *BPUE_NN* transformée centrée-réduite expliquée par la métrique *BPUE_ALL* également transformée centrée-réduite. Cette variable est ensuite centrée et réduite (sans lui appliquer de fonction de transformation au préalable).

En plus de ces trois variables de "pression", on utilise les variables de l'environnement suivantes dans les modèles des métriques constitutives des indices : *Pmax*, *Alti*, *Slac*, *Tmoy*, *Tamp*, *TRT*, *Marn*, *Ig*, *Jour*, *Jour2* (carré de la variable jour).

Limitation de la multi-colinéarité entre les variables explicatives dans les modèles des métriques.

Pour limiter la multi-colinéarité entre les variables explicatives dans les modèles, certaines variables environnementales sont exclues sur la base du 'variance inflation factor' ou VIF. Il est maximum pour la variable *SBV* (14.8) qui est ainsi exclue. Le VIF maximum descend alors à 5.23, ce qui est un niveau acceptable. Le seuil de VIF utilisé varie selon les études, par exemple entre 3 et 10 (Zuur et al. 2010). Les variables restantes sont conservées.

Tableau 3. Corrélation entre variables de l'environnement et de pression pour les 328 campagnes utilisés dans cette étude (lacs naturels et retenues)

	<i>SBV</i>	<i>Pmax</i>	<i>Alti</i>	<i>Slac</i>	<i>Tamp</i>	<i>TRT</i>	<i>Marn</i>	<i>Ig</i>	<i>TEau10</i>	<i>Jour</i>	<i>Jour2</i>	<i>Press</i>	<i>R_NN</i>
<i>SBV</i>	1	0.45	-0.13	0.52	0.01	-0.51	0.32	-0.35	-0.03	0.11	-0.11	0.02	0.12
<i>Pmax</i>	0.45	1	0.5	0.45	0.47	0.21	0.66	0.44	-0.41	0.06	0	-0.5	-0.03
<i>Alti</i>	-0.13	0.5	1	-0.07	0.6	0.2	0.3	0.56	-0.7	-0.02	0	-0.54	-0.23
<i>Slac</i>	0.52	0.45	-0.07	1	0.2	0.34	0.25	-0.33	-0.08	0.2	-0.1	-0.25	0
<i>Tamp</i>	0.01	0.47	0.6	0.2	1	0.34	0.21	0.37	-0.34	0.02	0.05	-0.51	-0.13
<i>TRT</i>	-0.51	0.21	0.2	0.34	0.34	1	0.12	0.24	-0.03	0.01	0.06	-0.29	-0.01
<i>Marn</i>	0.32	0.66	0.3	0.25	0.21	0.12	1	0.24	-0.17	-0.16	0.02	-0.21	0.07
<i>Ig</i>	-0.35	0.44	0.56	-0.33	0.37	0.24	0.24	1	-0.42	-0.07	0.14	-0.45	-0.24
<i>TEau10</i>	-0.03	-0.41	-0.7	-0.08	-0.34	-0.03	-0.17	-0.42	1	-0.2	0.2	0.53	0.37
<i>Jour</i>	0.11	0.06	-0.02	0.2	0.02	0.01	-0.16	-0.07	-0.2	1	-0.53	-0.15	-0.09
<i>Jour2</i>	-0.11	0	0	-0.1	0.05	0.06	0.02	0.14	0.2	-0.53	1	0.01	0.08
<i>Press</i>	0.02	-0.5	-0.54	-0.25	-0.51	-0.29	-0.21	-0.45	0.53	-0.15	0.01	1	0.35
<i>R_NN</i>	0.12	-0.03	-0.23	0	-0.13	-0.01	0.07	-0.24	0.37	-0.09	0.08	0.35	1

2.2. METHODES

Pour comparer l'utilisation de modèles avec interactions et sans interaction de pressions pour modéliser les métriques incluses dans les indices ichtyofaune des retenues (IIR) et des lacs naturels (IIL), la démarche suivante a été adoptée.

Etape 1 : Tirage aléatoire d'une campagne de pêche par plan d'eau.

Certains plans d'eau ayant été échantillonnés plusieurs fois, cette étape vise à ne retenir qu'une seule campagne par plan d'eau pour n'utiliser que des campagnes indépendantes (issues de plans d'eau différents) dans les analyses statistiques. On tire donc aléatoirement une campagne par plan d'eau. A partir de ce tirage aléatoire, deux jeux de données de pêche sont constitués pour chaque type de lacs (soit quatre jeux de données au total) :

- Un jeu comprenant autant de campagnes que de plans d'eau (une campagne par plan d'eau), appelé jeu de "calibration" dans la suite ;
- Un jeu comprenant toutes les campagnes non incluses dans le jeu de calibration, appelé jeu de "validation".

Les jeux de données de calibration et de validation ont été définis pour chaque type de plans d'eau. Puis les étapes 2 à 6 ont été réalisées pour chacune des métriques constitutives de chaque indice en prenant en compte les jeux de données adéquats.

Etape 2 : Modélisation de la métrique par les variables environnementales et de pressions.

La stratégie de modélisation des métriques en fonction des variables environnementales et des pressions est basée sur le "model averaging" (Burnham and Anderson 2002). Le modèle

final est établi en moyennant plusieurs modèles selon leur vraisemblance (mesurée par le critère d'AICc) (Akaike Information Criterion, AIC, pondérée pour prendre en compte les échantillons de petite taille, Burnham and Anderson 2002).

On commence par calculer tous les modèles possibles avec les variables suivantes en utilisant le jeu de données de calibration:

- Environnement : *Pmax, Alti, Slac, Tamp, TRT, Marn, Ig, Jour, Jour2*
- Pressions : *Press, TEau10, R_NN*
- Interactions de pressions : *Press:TEau10, Press:R_NN, TEau10:R_NN*

La seule exception concerne la modélisation de la métrique *BPUE_NN_NS* dans les retenues pour laquelle la variable de pression *R_NN*, qui est trop redondante avec la métrique à expliquer, n'est pas incluse dans les modèles.

On calcule l'AICc (Burnham and Anderson 2002), ainsi que le poids d'AICc, *AICw*, pour chaque modèle (la somme des poids d'AICc de tous les modèles est 1).

L'importance de chaque variable peut être estimée en sommant les poids (*AICw*) des modèles intégrant la variable. Cette somme est comprise entre 0 (importance nulle) et 1 (forte importance).

Pour les trois métriques de l'ILL, on applique également cette étape sur le jeu de données complet des lacs naturels, puisqu'on s'est rendu compte en cours d'analyse que les modèles n'utilisant qu'une campagne par plan d'eau étaient sur-paramétrés (voir résultats). On interprétera le résultat des modèles avec ce jeu de données complet (à la place de ceux issus du jeu de données de calibration).

Etape 3 : Calcul du modèle moyen

On calcule un modèle moyen (*model averaging*, Burnham and Anderson 2002) en moyennant les modèles avec le plus fort poids d'AICc jusqu'à totaliser 95% du poids total. Les coefficients du modèle final sont ainsi obtenus en faisant la moyenne des coefficients de ces modèles pondérées par leur poids. Comme expliqué à l'étape 2, on utilise les modèles issus du jeu de données de calibration pour les retenues, mais les modèles issus du jeu de données complet pour l'étude sur les lacs naturels.

Pour avoir une idée de la qualité d'ajustement de chaque modèle, on calcule le R^2 de la régression entre les observations et les prédictions issues du modèle, pour les données de calibration d'une part et pour les données de validation d'autre part. On obtient ainsi deux R^2 . Notons que les R^2 calculés ici ne sont pas corrigés pour prendre en compte la différence du nombre de paramètres entre les modèles avec et sans interactions, étant donné que les modèles sont issus de la moyenne de plusieurs modèles ayant des nombres de paramètres différents.

Pour les lacs naturels on calcule également le R^2 avec les données utilisées pour calibrer le modèle issu du jeu de données complet (dans ce cas on ne calcule qu'un R^2 car il n'y a pas de données non utilisées pour calculer un R^2 de "validation").

Etape 4 : Modèle sans interaction

Pour évaluer l'effet des interactions, on répète les étapes 2 à 3 sans intégrer les interactions dans les modèles. Les modèles sans interaction sont estimés sur les mêmes jeux de données que précédemment.

Comme pour les modèles avec interactions (voir étape 3), on calcule les R^2 des régressions entre données observées et données prédites (mais sans interaction), pour les jeux de données de calibration et de validation et le jeu de données global des lacs naturels.

Etape 5 : Représentation des résultats

Vérification de la structure des résidus des modèles complets avec interactions.

Pour faciliter l'interprétation de chaque interaction significative (p -value ≤ 0.05), les effets des deux variables de pressions et de leur interaction sur la métrique sont visualisés à l'aide de deux graphiques. Ces graphiques représentent, en fonction des valeurs des pressions, uniquement la composante liée aux deux variables de l'interaction intervenant dans les valeurs théoriques de la métrique, prédites par le modèle avec interactions. Il s'agit de la somme de trois termes (un pour chaque effet simple et un pour leur interaction) dont chacun est le produit du coefficient estimé et de la valeur de la pression (produit des deux pressions pour l'interaction).

Sur le premier graphique, chaque axe correspond à une pression. Les valeurs théoriques de l'effet de l'interaction pour chaque couple de valeurs de pressions sont représentées par un dégradé allant du bleu (faibles valeurs) au rouge (fortes valeurs). Le deuxième graphique est un "effect display" (Fox 2003), et représente également les valeurs théoriques prédites de l'effet des variables de l'interaction (en ordonnée), en fonction d'une des deux pressions (en abscisse) et de l'autre pression dont différentes valeurs sont représentées par une courbe distincte (de -2 à 2 par pas de 0.4). Chaque droite permet ainsi de visualiser la pente de la relation estimée de la métrique en fonction d'une pression, pour un niveau donné de la deuxième pression.

Etape 6 : Calcul d'un EQR à partir des modèles avec et sans interactions

L'évaluation de l'état écologique des plans d'eau s'effectue en comparant la valeur observée de la métrique (issue de l'échantillonnage) avec la valeur de référence théorique observable en absence de pressions. Pour les indices IIL et IIR ces valeurs théoriques sont les valeurs prédites par les modèles statistiques pour des niveaux de pression faibles. Ces écarts sont ensuite traduits en ratio de qualité écologique (EQR) pour que l'évaluation s'effectue selon les critères de la directive cadre sur l'eau (DCE 2000, Hering et al. 2006).

Pour chaque observation (caractéristique du peuplement de poissons dans un lac donné à un moment donné), O , du jeu de données complet, on calcule une "prédiction théorique" des métriques en l'absence de pression, Pth , en utilisant pour $Press$, les valeurs $TotalP = 10 \mu\text{g/L}$ et $CLC = 0.10$. Ce calcul est fait pour les prédictions de métriques issues du modèle avec interactions de l'étape 3, et du modèle sans interaction de l'étape 4. Pour chaque observation, ceci permet de calculer deux EQRs définis selon la formule :

$$EQR = 1 - \frac{(O - Pth) - (O - Pth)_{5\%}}{(O - Pth)_{95\%} - (O - Pth)_{5\%}}$$

Les indices 5% et 95% dans la formule font référence aux quantiles 5% et 95% des différences entre observations et prédictions théoriques, estimées à partir de la distribution des différences calculées pour toutes les données du jeu complet. Cette étape et la suivante sont réalisées séparément pour chaque type de plans d'eau concerné.

Etape 7 : Comparaison des moyennes d'EQR, avec interactions versus sans interaction

Pour chaque observation, on fait la moyenne des EQRs des trois métriques, d'une part pour les EQRs issus des modèles avec interactions et d'autre part pour les EQRs issus des

modèles sans interaction. On compare ensuite graphiquement ces deux EQRs. On peut positionner des limites théoriques aux EQRs pour définir des classes d'état, au quantile 75%, Q_{75} , de la distribution des moyennes d'EQRs (limite entre états bon et très bon), puis à $1 \times Q_{75}/4$ (limite entre états mauvais et médiocre), $2 \times Q_{75}/4$ (limite entre états médiocre et moyen), et $3 \times Q_{75}/4$ (limite entre états moyen et bon). Ces limites de classes ont été définies selon des critères classiquement utilisées pour définir les classes d'état écologique, par exemple pour l'IIR (Miguet et al. 2018b) ou pour l'ILL avant intercalibration (Ritterbusch et al. 2017). On les recalcule ici à partir des distributions de la moyenne des EQRs des deux cas de l'étude.

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R (version 3.5.1; R Core Team 2018), et les bibliothèques, *MuMIn* (1.42.1; Barton 2018), *plot3D* (1.1.1; Soetaert 2017) et *usdm* (Naimi et al. 2014).

3. RESULTATS

Les R^2 des modèles avec interactions des métriques dans les retenues varient entre 0.52 et 0.60 pour les données de calibration et entre 0.37 et 0.49 pour les données de validation (Tableau 4). Ces valeurs sont légèrement plus élevées que les R^2 calculés sur les modèles sans interaction.

Les R^2 des modèles avec interactions des métriques dans les lacs naturels varient entre 0.70 et 0.81 pour les données de calibration et entre 0.25 et 0.50 pour le jeu de données de validation (Tableau 4). La différence entre les R^2 calculés avec les deux jeux de données (calibration *versus* validation) est assez forte et suggère un sur-paramétrage. La différence de R^2 entre les deux jeux de données est plus faible avec les modèles de métriques sans interaction. Les R^2 de validation des modèles sans interaction sont plus élevés que ceux des modèles avec interactions, suggérant qu'il faut plutôt utiliser les modèles sans interaction pour modéliser les métriques. Ceci provient du nombre de paramètres à estimer (interactions incluses), élevé par rapport au nombre de campagnes utilisées pour calibrer les modèles. Les R^2 associés aux modèles des métriques pour les lacs naturels développés sur toutes les campagnes (en autorisant plusieurs campagnes par lac) sont légèrement plus élevés pour les modèles avec interactions (0.55 à 0.65) que pour les modèles sans interaction (0.53 à 0.62) comme indiqué dans le Tableau 6, mais on ne peut alors plus calculer de R^2 de "validation" avec des campagnes non utilisées dans le modèle.

Pour cette raison, pour les lacs naturels, la suite des résultats utilise les modèles des métriques calculés sur l'ensemble des données. Pour les retenues, on utilise les modèles calculés avec les données de calibration (voir méthode).

Tableau 4. R^2 des modèles (Observation ~ Prédiction) pour les modèles avec et sans interaction calculés avec les données de calibration (retenues et lacs naturels) et toutes les données (lacs naturels seulement). Les R^2 sont calculés avec les données de calibration puis de validation, ou toutes les données selon le cas. N : Taille d'échantillon.

Données utilisées pour ajuster le modèle									
Type de plan d'eau	Jeu de calibration			Jeu de calibration			Jeu complet		
	Retenue			Lac naturel			Lac naturel		
Métrique	BPUE _ALL	BPUE _PLAN	BPUE _NN_NS	BPUE _ALL	CPUE _ALL	CPUE _OMNI	BPUE _ALL	CPUE _ALL	CPUE _OMNI
R^2 – Calibration – Avec interactions	0.60	0.44	0.52	0.70	0.81	0.70			
R^2 – Validation – Avec interactions	0.49	0.37	0.38	0.50	0.28	0.25			
R^2 – Toutes les données – Avec interactions							0.65	0.63	0.55
R^2 – Calibration – Sans interaction	0.54	0.42	0.48	0.66	0.56	0.50			
R^2 – Validation – Sans interaction	0.47	0.39	0.35	0.49	0.45	0.54			
R^2 – Toutes les données – Sans interaction							0.62	0.55	0.53
N – Calibration	181	181	181	39	39	39			
N – Validation	74	74	74	34	34	34			
N - Total							73	73	73

Les trois variables de pression (et parfois leurs interactions) sont les variables qui ressortent les plus importantes dans les retenues et lacs naturels, même si les autres variables ont toutefois des poids d'AICc non négligeables. Une exception est la métrique *BPUE_NN_NS* dans les retenues pour laquelle plusieurs variables de l'environnement ressortent également très importantes (plusieurs poids valant 1). La variable de pression d'eutrophisation est importante pour toutes les métriques sauf *CPUE_OMNI* dans les lacs naturels. La température de l'eau (*TEau10*) est importante pour *BPUE_ALL* et *BPUE_NN_NS* dans les retenues et *CPUE_ALL* dans les lacs naturels. *R_NN* est importante pour *BPUE_ALL* et *BPUE_PLAN* dans les retenues, et *BPUE_ALL* et *CPUE_ALL* dans les lacs naturels. Seules trois interactions ressortent particulièrement importantes : *Press:R_NN* pour *BPUE_ALL* et *Press:TEau10* pour *BPUE_NN_NS* dans les retenues et *CPUE_ALL* pour les lacs naturels.

Tableau 5 - Importance des variables évaluée avec les poids d'AICc (*AICcw*)

	Retenue <i>BPUE_ALL</i>	Retenue <i>BPUE_PLAN</i>	Retenue <i>BPUE_NN_NS</i>	Lac naturel <i>BPUE_ALL</i>	Lac naturel <i>CPUE_ALL</i>	Lac naturel <i>CPUE_OMNI</i>
<i>Pmax</i>	1	0.62	1	0.79	0.77	0.62
<i>Alti</i>	0.29	0.28	0.29	0.4	0.7	0.31
<i>Slac</i>	0.86	0.4	1	0.41	0.75	0.57
<i>Tamp</i>	0.29	0.25	1	0.52	0.48	0.25
<i>TRT</i>	0.39	0.49	1	0.29	0.3	0.38
<i>Marn</i>	0.25	0.41	0.82	0.36	0.47	0.23
<i>Ig</i>	0.89	0.72	1	0.59	0.36	0.67
<i>Jour</i>	0.25	0.27	0.29	0.22	0.37	0.29
<i>Jour2</i>	0.98	0.25	0.31	0.21	0.38	0.21
<i>Press</i>	1	1	1	0.95	1	0.76
<i>TEau10</i>	0.94	0.69	1	0.73	0.98	0.84
<i>R_NN</i>	1	0.98	-	1	0.98	0.76
<i>Press:TEau10</i>	0.65	0.32	1	0.18	0.94	0.18
<i>Press:R_NN</i>	0.95	0.63	-	0.79	0.32	0.33
<i>TEau10:R_NN</i>	0.71	0.2	-	0.17	0.31	0.26

Les coefficients significatifs dans les modèles concernent le plus souvent les variables de pression sauf dans le cas de la métrique *BPUE_NN_NS* pour laquelle plusieurs variables de l'environnement ont des coefficients significatifs (Tableau 6).

L'effet de la pression d'eutrophisation est significatif et positif pour les trois métriques de l'IIR : *BPUE_ALL*, *BPUE_PLAN* et *BPUE_NN_NS* et pour les métriques *BPUE_ALL* et *CPUE_ALL* calculées pour les lacs naturels (Tableau 6).

L'effet de la température de l'eau (*TEau10*) est significatif et positif sur les métriques *BPUE_NN_NS* dans les retenues et *CPUE_ALL* dans les lacs naturels (Tableau 6).

L'effet des espèces non-natives est positif et significatif sur la métrique *BPUE_PLAN* dans les retenues, et négatif et significatif sur la métrique *BPUE_ALL* dans les lacs naturels (effet négatif) (Tableau 6).

Des effets significatifs des interactions entre les variables *Press* x *TEau10* (eutrophisation x température de l'eau) sont mesurés sur les métriques *BPUE_NN_NS* en retenues et *CPUE_ALL* en lacs naturels ; un effet significatif de l'interaction *Press* x *R_NN* (eutrophisation x pression des espèces non-natives) est aussi détecté sur la métrique *BPUE_ALL* en retenue (Tableau 6). Ces interactions significatives sont toutes positives et le signe des effets simples associés à ces interactions est également positif (lorsqu'il est significatif).

Tableau 6 - Coefficients issus du model averaging (erreur standard entre parenthèses). '****' : p-value ≤ 0.001 ; '***' : 0.001 < p-value ≤ 0.01 ; '**' : 0.01 < p-value ≤ 0.1 ; '.' : 0.1 < p-value ≤ 0.05 ; ' ' : 0.05 < p-value.

	Retenue <i>BPUE_ALL</i>	Retenue <i>BPUE_PLAN</i>	Retenue <i>BPUE_NN_NS</i>	Lac naturel <i>BPUE_ALL</i>	Lac naturel <i>CPUE_ALL</i>	Lac naturel <i>CPUE_OMNI</i>
Intercept	4.011 (0.059) ***	1.544 (0.100) ***	1.521 (0.097) ***	3.711 (0.123) ***	0.665 (0.087) ***	0.402 (0.055) ***
<i>Pmax</i>	-0.431 (0.087) ***	-0.170 (0.180)	0.647 (0.173) ***	-0.187 (0.128)	-0.127 (0.096)	-0.045 (0.050)
<i>Alti</i>	-0.010 (0.034)	-0.009 (0.073)	0.021 (0.073)	0.051 (0.109)	0.118 (0.103)	0.003 (0.032)
<i>Slac</i>	0.206 (0.114) .	-0.016 (0.154)	-0.708 (0.191) ***	-0.005 (0.080)	0.076 (0.061)	-0.033 (0.045)
<i>Tamp</i>	0.007 (0.025)	0.002 (0.047)	0.346 (0.084) ***	-0.073 (0.100)	0.038 (0.054)	-0.002 (0.019)
<i>TRT</i>	0.018 (0.037)	-0.062 (0.091)	0.354 (0.087) ***	0.016 (0.048)	0.011 (0.030)	0.015 (0.030)
<i>Marn</i>	0.002 (0.023)	-0.047 (0.092)	-0.196 (0.124)	-0.050 (0.108)	-0.048 (0.072)	0.001 (0.025)
<i>Ig</i>	0.206 (0.104) *	-0.197 (0.174)	-0.790 (0.161) ***	-0.089 (0.111)	-0.014 (0.054)	-0.063 (0.063)
<i>Jour</i>	-0.003 (0.020)	0.009 (0.045)	0.013 (0.044)	0.001 (0.031)	-0.018 (0.034)	-0.007 (0.020)
<i>Jour2</i>	-0.101 (0.032) **	-0.001 (0.038)	-0.016 (0.043)	-0.002 (0.027)	-0.018 (0.032)	0.000 (0.012)
<i>Press</i>	0.222 (0.048) ***	0.554 (0.117) ***	0.548 (0.102) ***	0.292 (0.131) *	0.276 (0.080) ***	0.078 (0.065)
<i>TEau10</i>	0.039 (0.053)	-0.132 (0.140)	0.416 (0.104) ***	0.130 (0.141)	0.253 (0.117) *	0.063 (0.047)
<i>R_NN</i>	-0.070 (0.039) .	0.228 (0.093) *	-	-0.168 (0.085) *	-0.091 (0.049) .	-0.015 (0.032)
<i>Press:TEau10</i>	-0.050 (0.048)	-0.041 (0.080)	0.281 (0.078) ***	0.009 (0.049)	0.167 (0.069) *	0.005 (0.020)
<i>Press:R_NN</i>	0.113 (0.048) *	0.099 (0.102)	-	0.180 (0.125)	0.020 (0.047)	0.023 (0.041)
<i>TEau10:R_NN</i>	0.058 (0.049)	0.007 (0.044)	-	-0.001 (0.029)	0.012 (0.028)	0.009 (0.020)

La Figure 1 présente graphiquement l'effet associé à chacune des trois interactions significatives mises en évidence (Figure 1a et Figure 1b), dans chaque cas la somme des deux effets simples et de l'effet interactif pour des valeurs des deux pressions variant de -2 à 2. La Figure 1b représente pour chaque métrique l'effet de l'interaction entre la pression d'eutrophisation (en abscisse) et la seconde pression intervenant dans l'interaction (une droite pour une valeur différente de cette deuxième variable de pression, non-natives ou température de l'eau).

L'effet de l'eutrophisation sur la biomasse totale ($BPUE_ALL$) est d'autant plus marqué que la BPUE de non-native est forte. Ceci s'explique par les coefficients positifs de l'interaction et de la variable *Press* dans le modèle. Lorsque la BPUE de non-native est faible, l'effet de l'eutrophisation est lui-même limité, alors que lorsque la BPUE de non-native est forte l'écart de BPUE sera très grand entre une eutrophisation très faible et une eutrophisation très forte (visible par la pente importante pour une BPUE de non-native se rapprochant de 2 et par le contraste des couleurs sur le haut de la Figure 1a panel de gauche).

L'effet de l'eutrophisation sur $BPUE_NN_NS$ dans les retenues et sur $CPUE_ALL$ dans les lacs naturel sont positifs pour les températures les plus élevées, mais négligeables pour les températures les plus basses.

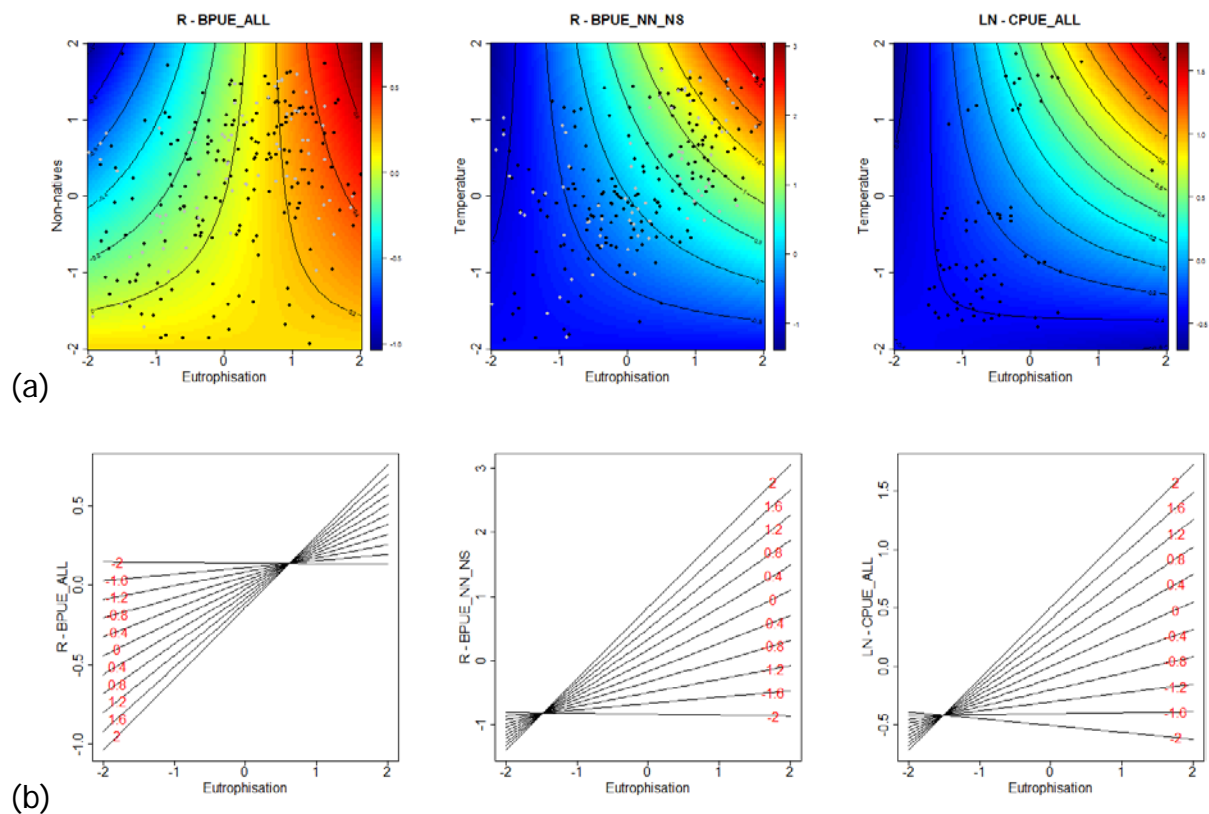


Figure 1. Représentation de l'effet des pressions pour les couples de pression dont l'interaction est significative (interaction entre l'eutrophisation et soit les non-natives soit la température selon le cas) sur la métrique. (a) Le gradient de couleur du bleu au rouge représente une augmentation de l'effet de l'eutrophisation et de l'autre pression. Points noirs : observations de calibration. Points gris : observations de validation. (b) effet de l'eutrophisation sur les trois métriques pour lesquelles une interaction significative positive est mise en évidence, pour différentes valeurs (indiquées en rouge sur chaque courbe) de l'autre variable de pression intervenant dans l'interaction (non-natives pour $BPUE_ALL$ dans les retenues, et température de l'eau pour $BPUE_NN_NS$ dans les retenues et $CPUE_ALL$ dans les lacs naturels).

La Figure 2 présente pour chacun des types de lac (retenues à gauche et lacs naturels à droite) la moyenne des trois EQRs définis pour chaque métrique de chaque indice, pour les modèles avec interactions (en ordonnée) et sans interaction (en abscisse). Les lignes rouges sont des limites possibles de classes d'indices "théoriques" qui auraient été définies à partir de ces métriques et modèles. On observe que pour les retenues la variation entre les modèles avec interactions et les modèles sans interaction est faible. Les évaluations sont généralement identiques ou diffèrent globalement d'une classe.

Pour les lacs naturels les résultats sont plus contrastés. Pour la majorité des plans d'eau on observe une bonne correspondance entre les deux EQRs moyens. Néanmoins certains lacs montrent de forts écarts conduisant à des classifications théoriques relativement différentes, jusqu'à deux classes d'écart, en particulier pour les valeurs d'EQR inférieures à 0.6.

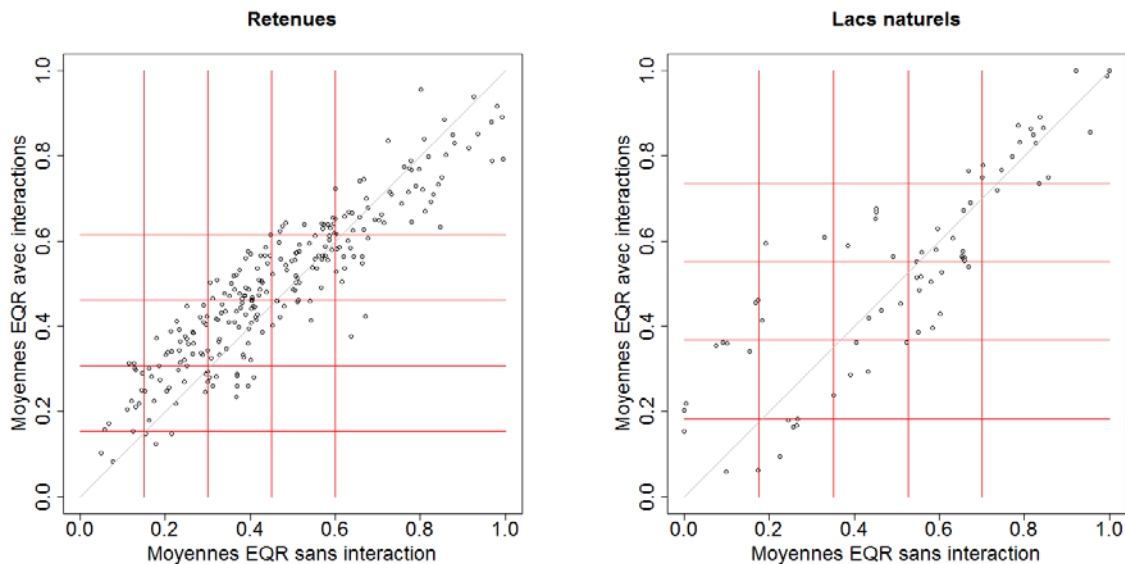


Figure 2. Comparaison des moyennes d'EQRs des 3 métriques de chacun des types de plan d'eau (retenues à gauche et lacs naturels à droite) pour des modèles avec (ordonnée) et sans (abscisse) interactions. Chaque point représente une campagne de pêche. Les valeurs les plus élevées d'EQR représentent des campagnes pour lesquelles le plan d'eau est de meilleure qualité. Les lignes rouges représentent des limites de classes d'indices qui aurait pu être définit à partir de ces moyennes d'EQR (une limite au quantile 75% puis 3 limites régulièrement espacés entre 0 et ce quantile).

4. DISCUSSION

L'utilisation de modèles avec interactions entraîne une augmentation faible des R^2 par rapport aux modèles sans interaction dans le cas des retenues. Pour les lacs naturels on a dû utiliser l'ensemble des campagnes pour estimer des modèles avec interactions. En se limitant à une campagne par plan d'eau les modèles sans interaction avaient des valeurs de R^2 (de validation) plus élevées que les modèles avec interactions, sûrement en raison du faible nombre de données par rapport au nombre de paramètres à estimer, mais pas forcément de la non-présence d'interaction dans ces systèmes.

Les trois pressions, eutrophisation, température et espèces non-natives, ressortent significatives pour certaines métriques dans les retenues ou les lacs naturels, ce qui est en accord avec une précédente étude sur des retenues et lacs naturels européens où les pressions eutrophisation et espèces non-natives ressortent importantes pour expliquer plusieurs métriques (Brucet et al. 2013, Argillier et al. 2015).

L'effet de l'eutrophisation est globalement positif sur les métriques, ce qui est en accord avec ce qui a été mis en évidence lors de la définition des indices (Argillier et al. 2013, Miguet et al. 2018b). On peut cependant noter la non-détection d'un effet significatif de la pression d'eutrophisation sur *CPUE_OMNI* dans les lacs naturels pourtant sélectionnée comme métrique pour l'IIL. Ceci peut provenir du fait que l'indice a été construit sur un jeu de données européen plus grand et couvrant un gradient plus large de valeurs de

pressions et de conditions environnementales que le jeu de données français utilisé dans la présente étude. On peut imaginer que cette différence de taille du jeu de données se traduise par une diminution de la gamme de variation des valeurs prises par la métrique *CPUE_OMNI*.

L'effet de la température de l'eau sur les métriques, positif quand il est significatif (*BPUE_NN_NS* dans les retenues et *CPUE_ALL* dans les lacs naturels), est en accord avec l'effet positif connu de la température sur la productivité pour les poissons (Downing and Plante 1993).

L'effet de la pression des non-natives est positif sur la métrique planctivores en retenue représentée principalement par la brème (*Abramis brama*) mais est négatif sur les abondances pondérales des poissons en lacs naturels, ce qui est difficile à interpréter sans une connaissance et analyse plus fine de la composition spécifique des peuplements et des pratiques de gestion.

L'effet interactif positif significatif révélé entre *Press* (eutrophisation) et *R_NN* (non-natives) sur la BPUE dans les retenues indique que l'effet positif de la pression d'eutrophisation augmente avec la pression des espèces non-natives. Lorsque la pression en non-native est plus importante, les deux pressions ont un effet synergique et les valeurs des métriques sont plus fortes qu'avec un simple effet additif des pressions. Cette interaction positive peut s'expliquer par le fait que les espèces non-natives (sandre *Sander lucioperca* et poisson chat *Ameiurus melas*, les plus fréquents en plans d'eau) répondent plus fortement à l'eutrophisation. Elles pourraient être mieux adaptées aux conditions médiocres du milieu que les espèces natives. Un effet interactif entre eutrophisation et espèces non-natives a aussi été mis en évidence sur deux métriques caractéristiques des peuplements piscicoles des retenues méditerranéennes, l'abondance des espèces lithophiles et l'abondance des espèces qui gardent leur nid (Argillier et al. 2015).

Les deux interactions significatives entre l'eutrophisation et la température signifient que l'effet positif de l'eutrophisation sur *BPUE_NN_NS* dans les retenues et *CPUE_ALL* dans les lacs naturels est plus fort pour les plans d'eau les plus chauds. L'association entre l'augmentation de la CPUE et l'eutrophisation est relativement connue (Argillier et al. 2013). L'augmentation de *BPUE_NN_NS* (non-natives hors salmonidées) avec l'eutrophisation pourrait aussi venir du fait que les lacs les plus eutrophes sont aussi les plus manipulés. On trouve en outre ici que ces augmentations seraient encore plus importantes dans les plans d'eau les plus chauds, qui sont en moyennes ceux situés plus bas en altitude donc sûrement ceux subissant aussi la plus forte pression anthropique. Ce résultat suggère qu'une augmentation des températures dans les plans d'eau pourrait amplifier l'effet de l'eutrophisation. Mais il faut considérer cette interprétation avec beaucoup de précautions puisque le gradient de température ici est corrélé avec un gradient d'altitude. On n'a pas étudié un effet d'une augmentation de la température au sein de chaque plan d'eau.

Notre étude montre qu'il existe des interactions significatives entre les trois pressions étudiées (eutrophisation, température de l'eau, espèces non-native). La comparaison des EQR moyens obtenus avec et sans interactions peut générer un écart d'une classe d'état dans l'évaluation de l'état/potentiel écologique des plans d'eau.

Cependant, les R^2 des modèles avec interactions semblent seulement légèrement améliorés et il faudrait collecter davantage de données sur les plans d'eau, notamment sur les lacs naturels, pour que l'importance de la prise en compte des interactions dans les modèles soit mieux mesurée.

5. GLOSSAIRE

Base PLAN_DEAU : Base de données gérée par le Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea "Hydroécologie des plans d'eau", rassemblant des données physico-chimiques et biologiques relatives aux plans d'eau de France métropolitaine.

6. SIGLES & ABREVIATIONS

SBV : Surface du bassin versant (km²)

Pmax : Profondeur maximale du plan d'eau (m)

Alti : Altitude du plan d'eau (m)

Slac : Superficie du plan d'eau (km²)

Tamp : Amplitude annuelle de la température de l'air, moyenne sur 10 ans (°C)

TRT : Temps de résidence (jour)

Marn : Marnage (m)

Ig : Indice global de pente (m/km)

TEau10 : Température de l'eau moyenne dans la zone euphotique, moyenne sur 10 ans (°C)

Jour : Jour de la campagne (jour), nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier de l'année en cours

R_NN : Variable de pression des espèces non-natives

TotalP : Concentration en phosphore total dans la zone euphotique (µg/L)

CLC : Proportion d'occupation non-naturelle du sol sur le bassin versant (-)

Press : Variable de pression d'eutrophisation

AIC : Akaike information criterion (critère d'information d'Akaike)

ALTI : Altitude du plan d'eau

BPUE : Biomasse par unité d'effort (Biomass per unit effort), exprimé en g/m²/12h ou g/filet/12h

CPUE : Comptage par unité d'effort (Catch per unit effort), exprimé en individus/m²/12h ou individus/filet/12h

CPUE_OMNI : CPUE des espèces omnivores

IIL : Indicateur ichtyofaune lacustre

IIR : Indicateur ichtyofaune pour les retenues

CPUE_ALL : CPUE de toutes les espèces de la communauté

BPUE_ALL : BPUE de toutes les espèces de la communauté

BPUE_NN_NS : BPUE des espèces non-natives, en excluant les salmonidés

BPUE_PLAN : BPUE des espèces planctivores

7. BIBLIOGRAPHIE

- Argillier, C., S. Caussé, M. Gevrey, S. Pédrón, J. De Bortoli, S. Brucet, M. Emmrich, E. Jeppesen, T. Lauridsen, T. Mehner, M. Olin, M. Rask, P. Volta, I. J. Winfield, F. Kelly, T. Krause, A. Palm, and K. Holmgren. 2013. Development of a fish-based index to assess the eutrophication status of European lakes. *Hydrobiologia* 704:193-211.
- Argillier, C., N. Teichert, A. Sagouis, M. Lepage, R. Schinegger, M. Palt, S. Schmutz, P. Segurado, M. T. Ferreira, G. Chust, A. Uriarte, and A. Borja. 2015. Deliverable 5.A: Report on the comparison of the sensitivity of fish metrics to multi-stressors in rivers, lakes and transitional waters. Projet FP7 MARS.
- Barton, K. 2018. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.42.1. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>.
- Brucet, S., S. Pédrón, T. Mehner, T. L. Lauridsen, C. Argillier, I. J. Winfield, P. Volta, M. Emmrich, T. Hesthagen, K. Holmgren, L. Benejam, F. Kelly, T. Krause, A. Palm, M. Rask, and E. Jeppesen. 2013. Fish diversity in European lakes: geographical factors dominate over anthropogenic pressures. *Freshwater Biology* 58:1779-1793.
- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer.
- CEN. 2015. Qualité de l'eau - Échantillonnage des poissons à l'aide de filets maillants (NF EN 14757).
- Crain, C. M., K. Kroeker, and B. S. Halpern. 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecology Letters* 11:1304-1315.
- Danis, P.-A. 2003. Modélisation du fonctionnement thermique, hydrologique et isotopique des systèmes lacustres reconstructions paléoclimatiques. □: sensibilité
- Danis, P.-A., R. Ferrer, M. Gevrey, and C. Argillier. 2012. Seuils des paramètres physicochimiques soutenant la biologie - Plans d'eau naturels. Rapport technique. Irstea, pôle AFB/Irstea, Aix-en-Provence (France).
- DCE. 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 32000L0060, adoptée le 23 octobre 2000, JO du 22 décembre 2000, p. 1-73.
- Downing, J. A., and C. Plante. 1993. Production of Fish Populations in Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 50:110-120.
- FAO. 1996. Crues et apports des Mandes pour l'estimation des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Page BULLETIN FAO D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE 54.
- Folt, C. L., C. Y. Chen, M. V Moore, and J. Burnaford. 1999. Synergism and antagonism among multiple stressors. *Limnology and Oceanography* 44:864-877.
- Hering, D., L. Carvalho, C. Argillier, M. Beklioglu, A. Borja, A. C. Cardoso, H. Duel, T. Ferreira, L. Globevnik, J. Hanganu, S. Hellsten, E. Jeppesen, V. Kodeš, A. L. Solheim, T. Nöges, S. Ormerod, Y. Panagopoulos, S. Schmutz, M. Venohr, and S. Birk. 2015. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — An introduction to the MARS project. *Science of The Total Environment* 503-504:10-21.
- Hering, D., C. K. Feld, O. Moog, and T. Ofenböck. 2006. 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* 566:311-324.
- Irz, P., J. De Bortoli, F. Michonneau, T. R. Whittier, T. Oberdorff, and C. Argillier. 2008.

- Controlling for natural variability in assessing the response of fish metrics to human pressures for lakes in north-east USA. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18:633-646.
- Logez, M., A. Maire, and C. Argillier. 2015. Principes et méthodes de calcul de l'indice ichtyofaune lacustre. Rapport technique. Irstea, pôle AFB/Irstea, Aix-en-Provence (France).
- Matuszek, J. E., and G. L. Beggs. 1988. Fish Species Richness in Relation to Lake Area, pH, and Other Abiotic Factors in Ontario Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45:1931-1941.
- Miguet, P., M. Logez, and C. Argillier. 2018a. Guide méthodologique de calcul de l'Indice Ichtyofaune pour les Retenues (IIR). Rapport technique. Irstea, Pôle AFB/Irstea. Aix-en-Provence (France).
- Miguet, P., M. Logez, M.-H. Lizée, and C. Argillier. 2018b. Développement de l'Indice Ichtyofaune pour l'évaluation du potentiel écologique des Retenues, l'IIR. Rapport scientifique. Irstea, Pôle AFB/Irstea. Aix-en-Provence (France).
- Naimi, B., N. A. S. Hamm, T. A. Groen, A. K. Skidmore, and A. G. Toxopeus. 2014. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography* 37:191-203.
- Nôges, P., C. Argillier, Á. Borja, J. M. Garmendia, J. Hanganu, V. Kodeš, F. Pletterbauer, A. Sagouis, and S. Birk. 2016. Quantified biotic and abiotic responses to multiple stress in freshwater, marine and ground waters. *Science of The Total Environment* 540:43-52.
- Paine, R. T., M. J. Tegner, and E. A. Johnson. 1998. Compounded Perturbations Yield Ecological Surprises. *Ecosystems* 1:535-545.
- Piggott, J. J., C. R. Townsend, and C. D. Matthaei. 2015. Reconceptualizing synergism and antagonism among multiple stressors. *Ecology and Evolution* 5:1538-1547.
- Prats, J., and P.-A. Danis. 2015. Optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau satellitaires. Rapport technique. Irstea, Pôle AFB/Irstea. Aix-en-Provence (France).
- Prats, J., M.-J. Salençon, M. Gant, and P.-A. Danis. 2018. Simulation of the hydrodynamic behaviour of a Mediterranean reservoir under different climate change and management scenarios. *Journal of Limnology* 77:62-81.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rathert, D., D. White, J. C. Sifneos, and R. M. Hughes. 1999. Environmental correlates of species richness for native freshwater fish in Oregon, U.S.A. *Journal of Biogeography* 26:257-273.
- Ritterbusch, D., C. Argillier, J. Arle, W. Białokoz, J. Birzaks, P. Blabolil, J. Breine, H. Draszkiwicz-Mioduszezowska, N. Jaarsma, I. Karottki, T. Krause, J. Kubečka, T. Lauridsen, M. Logez, A. Maire, A. Palm, G. Peirson, M. Říha, J. Szlakowski, T. Virbickas, and S. Poikane. 2017. Water Framework Directive Intercalibration: Central-Baltic Lake Fish fauna ecological assessment methods; Part A: Descriptions of fish-based lake assessment methods; EUR 28022 EN; doi:10.2791/396601.
- Schinegger, R., C. Trautwein, A. Melcher, and S. Schmutz. 2012. Multiple human pressures and their spatial patterns in European running waters. *Water and Environment Journal* 26:261-273.
- Soetaert, K. 2017. plot3D: Plotting Multi-Dimensional Data. R package version 1.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=plot3D>.
- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J.-M. Soubeyroux. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system.

International Journal of Climatology 30:1627-1644.

Zuur, A. F., E. N. Ieno, and C. S. Elphick. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution* 1:3-14.

8. TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Représentation de l'effet des pressions pour les couples de pression dont l'interaction est significative (interaction entre l'eutrophisation et soit les non-natives soit la température selon le cas) sur la métrique. (a) Le gradient de couleur du bleu au rouge représente une augmentation de l'effet de l'eutrophisation et de l'autre pression. Points noirs : observations de calibration. Points gris : observations de validation. (b) effet de l'eutrophisation sur les trois métriques pour lesquelles une interaction significative positive est mise en évidence, pour différentes valeurs (indiquées en rouge sur chaque courbe) de l'autre variable de pression intervenant dans l'interaction (non-natives pour BPUE_ALL dans les retenues, et température de l'eau pour BPUE_NN_NS dans les retenues et CPUE_ALL dans les lacs naturels). 20

Figure 2. Comparaison des moyennes d'EQRs des 3 métriques de chacun des types de plan d'eau (retenues à gauche et lacs naturels à droite) pour des modèles avec (ordonnée) et sans (abscisse) interactions. Chaque point représente une campagne de pêche. Les valeurs les plus élevées d'EQR représentent des campagnes pour lesquelles le plan d'eau est de meilleure qualité. Les lignes rouges représentent des limites de classes d'indices qui aurait pu être définies à partir de ces moyennes d'EQR (une limite au quantile 75% puis 3 limites régulièrement espacées entre 0 et ce quantile). 21

Tableau 1. Distribution des valeurs des métriques (m : moyenne, sd : écart-type) avant-transformation (pour chaque type de plan d'eau où la métrique est utilisée), et après transformation ($f(x)=\ln(1+x)$) pour l'ensemble des plans d'eau (tous). Les valeurs après transformation pour tous les plans d'eau sont celles qui sont utilisées pour centrer et réduire les métriques après la transformation. 11

Tableau 2. Distribution des valeurs des variables de l'environnement et de pression (m : moyenne, sd : écart-type) avant transformation sur les lacs naturels (LN) et sur les retenues (R), et après transformation ($fx = \ln(1+x)$, $fx = \arcsin x$ ou pas de transformation) sur l'ensemble des plans d'eau (Tous). Les valeurs après transformation pour tous les plans d'eau sont celles qui sont utilisées pour centrer et réduire les variables après la transformation. 13

Tableau 3. *Corrélation entre variables de l'environnement et de pression pour les 328 campagnes utilisés dans cette étude (lacs naturels et retenues)*..... 14

Tableau 4. R^2 des modèles (Observation ~ Prédiction) pour les modèles avec et sans interaction calculés avec les données de calibration (retenues et lacs naturels) et toutes les données (lacs naturels seulement). Les R^2 sont calculés avec les données de calibration puis de validation, ou toutes les données selon le cas. N : Taille d'échantillon..... 18

Tableau 5 - Importance des variables évaluée avec les poids d'AICc (AICcw)..... 18

Tableau 6 - Coefficients issus du model averaging (erreur standard entre parenthèses). '***' : p-value ≤ 0.001 ; '**' : $0.001 < p\text{-value} \leq 0.01$; '*' : $0.01 < p\text{-value} \leq 0.1$; '.' : $0.1 < p\text{-value} \leq 0.05$; ' ' : $0.05 < p\text{-value}$ 19

Irstea
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
01 40 96 61 21
www.irstea.fr

Agence Française pour la Biodiversité
Hall C - Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.afbiodiversite.fr