



HAL
open science

EAUYAPOC-Faisabilité: Etude de la faisabilité du développement d'un Indicateur d'évaluation de l'état écologique des grands cours d'eau de Guyane basé sur la communauté phytoplanctonique

Albin Meyer, Emilie Prygiel, Christophe Laplace-Treyture

► To cite this version:

Albin Meyer, Emilie Prygiel, Christophe Laplace-Treyture. EAUYAPOC-Faisabilité: Etude de la faisabilité du développement d'un Indicateur d'évaluation de l'état écologique des grands cours d'eau de Guyane basé sur la communauté phytoplanctonique. INRAE; CEREMA; OFB. 2023. hal-04412169

HAL Id: hal-04412169

<https://ofb.hal.science/hal-04412169>

Submitted on 23 Jan 2024

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.



EAUYAPOC-Faisabilité

Etude de la faisabilité du développement d'un Indicateur d'évaluation de l'état écologique des grands cours d'eau de Guyane basé sur la communauté phytoplanctonique

Albin MEYER
Emilie PRYGIEL
Christophe LAPLACE-TREYTURE

Novembre 2023



SOMMAIRE

Index des figures	4
Index des tableaux	6
Liste des abréviations.....	7
I. Introduction.....	8
II. Description et analyse des données disponibles	10
II.1 Les stations suivies	10
II.1.1 Comparaison des valeurs observées en Guyane et en métropole.....	14
II.1.2 Variations des principaux paramètres en fonction des stations et années.....	15
II.2 Les données météorologiques	19
II.3 Les données de pressions anthropiques	20
II.4 Les données phytoplanctoniques.....	23
III. Exploration des performances de métriques décrivant les communautés phytoplanctoniques	28
III.1 Description des métriques calculées.....	28
III.1.1 Les métriques de biomasse	28
III.1.2 Les métriques structurelles	28
III.1.3 Les métriques fonctionnelles	28
III.1.4 Les métriques de l'IPHYGE	30
III.1.5 Les métriques calculées à partir de l'application de la méthode TITAN	31
III.2 Analyses statistiques et calculs des performances des métriques	32
III.3 Analyse des performances des métriques.....	33
III.3.1 Performances des métriques de biomasse.....	33
III.3.2 Performances des métriques structurelles.....	34
III.3.3 Performances des métriques fonctionnelles	35
III.3.4 Performances de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives	36
III.3.5 Performances des métriques obtenues avec la méthode TITAN	45
IV. Préconisations et perspectives	48
IV.1 Importance des performances des mesures physico-chimiques	48
IV.2 Fréquence d'échantillonnage.....	49
IV.3 Gradient(s) de pression : sites de références et sites impactés.....	50
IV.4 Description des traits fonctionnels des taxons	51
IV.5 Perspectives	53
V. Références.....	55
VI. Annexes	57
VI.1 Figure supplémentaire	57
VI.2 Tableau supplémentaire	58
Résumé.....	59
Mots-clés	59

Index des figures

Figure 1 Localisation des 11 stations concernées par un suivi des communautés phytoplanctoniques.	11
Figure 2 Représentation synthétique des dates des campagnes de prélèvements physico-chimiques (en noir) et phytoplanctoniques (en vert). Un point = un prélèvement. Les prélèvements auparavant effectués sur la station Orpailleur sont représentés pour la station Dégrad Corrèze. Cette figure est inspirée d'une figure de Carayon et al. (2019).	12
Figure 3 Distributions des valeurs de quatre paramètres d'intérêt en Guyane (GUY ; en bleu) et en France métropolitaine (MET ; en vert). Les distributions des valeurs observées en métropole peuvent être tronquées. N = 49 pour la Guyane, N = 963 pour la métropole (données GCE bancarisées pour le développement de l'IPHYGE).	14
Figure 4 Distribution des valeurs des 23 paramètres physico-chimique, ainsi que du biovolume total, pour les 11 stations suivies. Le nombre de mesure varie en fonction des stations (se référer au Tableau 3).	16
Figure 5 Analyse en Composantes Principales des principaux paramètres pouvant indiquer des pressions anthropiques sur les GCE guyanais. Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Les valeurs manquantes en 2008 et 2009 ont été remplacées par les moyennes des autres mesures. A. Cercle des corrélations. Deux paramètres (chlorophylle-a et le biovolume total) ont été projetés comme des variables supplémentaires sur ce premier plan factoriel. Il s'agit des flèches en pointillés. B, C et D. Projection des coordonnées des OPC sur le premier plan factoriel en fonction de l'année de l'OPC (B.), de la station (C.) ou de la rivière (D.). Un point = une OPC. N = 49. d = taille des cases pour chaque graphique.	17
Figure 6 Projection des coordonnées des OPC sur le premier plan factoriel en fonction du réseau de suivi des stations (cf. Figure 3). Un point = une OPC. N = 49. d = taille des cases pour chaque graphique.	18
Figure 7 Distribution des valeurs de cumuls mensuels de précipitations associées aux prélèvements phytoplanctoniques réalisés après 2016, en fonction de la station (à gauche) ou de l'année de réalisation du prélèvement (à droite).	19
Figure 8 Dendrogramme des stations en fonction des pressions observées et de leur niveau (cf. Tableau 4). Ce dendrogramme a été construit grâce à un algorithme de Ward appliqué à une matrice de distance de Gower. Les couleurs correspondent au niveau de dégradation (cf. Tableau 4).	22
Figure 9 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Projections des OPC sur le premier plan factoriel en fonction de leur station (A.), de l'année (B.), du cours d'eau (C.) ou du statut LIRR/IRR (D. ; cf. §II.3). Un point = une OPC. N = 49. d = taille des cases pour chaque graphique.	24
Figure 10 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les projections des genres sur le premier plan factoriel en fonction de leur embranchement. Un point = un genre. S = 127 genres.	25
Figure 11 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Projections des OPC sur le premier plan factoriel. Les couleurs des étiquettes renseignent sur le cumul mensuel des précipitations, avec des étiquettes en gris pour les valeurs manquantes (i.e. pour 2008). N = 49 OPC.	27
Figure 12 Exemples de calcul de l'efficacité de discrimination (DE) d'une métrique quelconque en fonction de la distribution de ses valeurs en situations impactées (IRR) ou en situations peu impactées (« de référence », LIRR). Les valeurs présentées sur cette figure ont été générées aléatoirement. Q25 = 1 ^{er} quartile, Q75 = 3 ^{ème} quartile. Figure reprise de Meyer et al. (2023).	33
Figure 13 Résultats des régressions linéaires entre différents proxys de la biomasse phytoplanctonique avec les concentrations en phosphore total. N = 49 OPC.	34

Figure 14 Performances des métriques listées dans le Tableau 5 sous la forme de régressions linéaires (droite en pointillés) avec les concentrations en phosphore total et sous la forme de boîtes à moustache des distributions des valeurs de ces métriques dans les IRR (en rouge) et dans les LIRR (en vert). Les valeurs de R ajustés et les valeurs de DE sont indiquées au-dessus de chaque graphique. N = 49. 39

Figure 15 Régressions linéaires entre les concentrations en phosphore total, en azote Kjeldahl et en nitrates avec les valeurs exprimées en EQR de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives pour deux jeux de données : celui de développement de l'IPHYGE (N = 963 OPC de France métropolitaine ; en noir) et celui guyanais (N = 49 OPC ; en bleu). Les droites de régressions sont en pointillées. 43

Figure 16 Boîtes à moustaches de la distribution des valeurs des concentrations en phosphore total, en azote Kjeldahl et en nitrates en fonction des classes d'état biologique attribuées à partir des valeurs de l'IPHYGE. Les boîtes colorées correspondent aux données métropolitaines (MET) et les boîtes grises correspondent aux données guyanaises (GUY). Le lettrage des boîtes renseigne sur les groupes identifiés suite à des tests post hoc de comparaisons multiples effectués à la suite d'un test significatif de Kruskal-Wallis. 44

Figure 17 Performances des meilleures métriques développées avec la méthode TITAN pour trois gradients d'intérêt : l'azote Kjeldahl (les deux figures du haut), le phosphore total (les deux figures du milieu) et les matières en suspension (MES ; les deux figures du bas). Les performances sont données sous la forme de régressions linéaires (droite en pointillés) des valeurs des paramètres d'intérêt en fonction des valeurs des métriques et sous la forme de boîtes à moustache des distributions des valeurs de ces métriques dans les IRR (en rouge) et dans les LIRR (en vert). Les valeurs de R ajustés et les valeurs de DE sont indiquées au-dessus de chaque graphique. N = 49. 47

Figure 18 Localisation des stations dont la biologie a été suivie en 2023. 52

Index des tableaux

- Tableau 1* Liste des stations. Les dénombrements d'OPC en bleu précisent les prélèvements effectués en 2008 (2009 pour CACV). Toutes les stations appartiennent au Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS). Certaines de ces stations sont considérées comme des « références », malgré les pressions subies. La colonne « Statut » renseigne sur ces stations de référence (Réf.). OPC Opération de Contrôle (couple « station x date »). 10
- Tableau 2* Détails de la réalisation des prélèvements phytoplanctoniques. L'étude préliminaire de 2008 a été menée sur un groupe de stations incluant d'autres stations que les 11 de notre étude. Les stations communes entre les deux jeux de données sont indiquées entre parenthèses pour 2008. 12
- Tableau 3* Liste des paramètres physico-chimiques mesurés dans les 11 stations suivies. Les étoiles précisent les paramètres pour lesquels l'intégralité des mesures n'est pas disponible. LQ Limite de Quantification. 13
- Tableau 4* Description des niveaux de pressions impactant les stations suivies. PI = station peu ou pas impactée (somme ≤ 2), MI = station modérément impactée ($3 \leq$ somme ≤ 6), TI = station très impactée (somme ≥ 7). 21
- Tableau 5* Performances des métriques vis-à-vis des concentrations en phosphore total, avec le R^2 ajusté obtenu via des régressions linéaires et le rho des tests de corrélation de Spearman. Les valeurs en gras indiquent les résultats significatifs. Pour les métriques par classe floristique, seules les performances de la meilleure métrique pour les 7 classes sont présentées. Pour les métriques fonctionnelles seules les performances des 10 meilleures métriques sont présentées. DE = efficacité de discrimination (les cases colorées indiquent les valeurs supérieures ou égales à 0,50 ; ce seuil est arbitraire). 38
- Tableau 6* Performances des métriques calculées à partir des listes de taxons d'alerte (genres) obtenues via l'application de la méthode TITAN pour trois paramètres d'intérêt. Les valeurs de R^2 ajustés en gras indiquent les résultats de régression linéaire significatifs. $z+/z\pm$ indique les métriques de richesses/biovolumes relatifs des taxons $z+$ par rapport aux mêmes valeurs pour l'ensemble des taxons d'alerte ($z+$ et $z-$). Les cases avec un fond vert illustrent les valeurs de DE supérieures à 0,50. 46

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFC : Analyse Factorielle des Correspondances

AMI : Appel à Manifestations d'Intérêt

CWM : Community Weighted Means

DCE : Directive Cadre européenne sur l'Eau

DE : efficacité de discrimination (Discrimination Efficiency)

DGTM Guyane : Direction Générale des Territoires et de la Mer de Guyane

EQR : Ecological Quality Ratio

GCE : Grand Cours d'Eau

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

IPHYGE : Indicateur PHYtoplancton pour les Grands cours d'Eau

IRR : Impaired River Reaches

LIRR : Least Impaired River Reaches

LQ : Limite de Quantification

MBP : Métrique de Biomasse Phytoplanctonique

MG-A : Métrique de composition au Genre - Azote Kjeldahl

MG-P Métrique de composition au Genre - Phosphore total

MS-N : Métrique de composition Spécifique - Nitrates

OEG : Office de l'Eau de Guyane

OFB : Office Français de la Biodiversité

OPC : OPération de Contrôle (couple « station x date »)

RCS : Réseau de Contrôle de Surveillance

TITAN : Threshold Indicator Taxa ANalysis

I. Introduction

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE ; European Council 2000) a comme objectif l'atteinte et le maintien des masses d'eau dans un bon état écologique. Cet état écologique prend en compte à la fois les composantes biotiques, physico-chimiques et hydromorphologiques de ces masses d'eau. La réalisation de l'objectif de la DCE nécessite donc de suivre l'état physico-chimique, hydromorphologique et biologique des masses d'eau. La mise en place de la DCE a ainsi mené au développement de nombreux indicateurs biologiques, basés sur différents éléments de qualité biologique, et ce en fonction des masses d'eau. En effet les indicateurs existants ne répondaient que rarement aux critères définis par la DCE pour l'évaluation de l'état biologique (Annexe 5 de la DCE ; European Council 2000).

Un certain nombre de bio-indicateurs a déjà été mis en place pour répondre au besoin de l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau guyanais, quelle que soit leur classe de taille. Ces indicateurs concernent différents maillons biologiques : les poissons (Tejerina-Garro et al. 2006), les macro-invertébrés benthiques (Thomas et al. 2001) et les diatomées benthiques (Carayon et al. 2020). Pour répondre aux exigences réglementaires de la DCE, notamment pour les grands cours d'eau guyanais, le développement d'un indicateur phytoplancton est à réaliser. Ainsi, INRAE et le Cerema ont déposé un projet commun en réponse à un appel à manifestations d'intérêt (AMI) lancé en 2021 par l'OFB dans lequel était listé le développement de cet indicateur.

Bien qu'accueilli favorablement, ce projet n'a pas été retenu pour un financement dans le cadre de cet AMI. En effet, certaines faiblesses techniques, en particulier concernant la non-prise en compte de certaines données antérieures, ont été relevées. Néanmoins, vu l'intérêt porté par les acteurs locaux (OEG et DGTM) à ce projet, des discussions ont été entamées entre les trois partenaires, OFB, INRAE et Cerema, afin d'envisager un financement de ce projet dans une nouvelle mouture permettant de répondre aux faiblesses techniques relevées. Le projet EAUYAPOC-Faisabilité est la résultante de ces discussions.

Ce projet a comme principal objectif d'utiliser les données nouvellement acquises sur le maillon phytoplancton en grands cours d'eau sur le territoire guyanais afin d'étudier la faisabilité du développement d'un indicateur d'évaluation de l'état écologique des grands cours d'eau de Guyane basé sur la communauté phytoplanctonique. Pour cela, le projet inclut différentes étapes :

- le formatage et l'intégration des données guyanaises à la base de données existante contenant les données phytoplanctoniques en grands cours d'eau métropolitains ;
- la mise-à-jour du référentiel taxonomique du Sandre (et du logiciel Phytobs) afin d'y intégrer les taxons guyanais et tenir compte de la synonymie ;
- l'analyse du jeu de données phytoplanctoniques disponibles (sa couverture typologique, sa robustesse, le nombre de prélèvements phytoplanctoniques et d'années par station,...) ;

- l'analyse du jeu de données de pressions (qualité des eaux, hydromorphologie) ;
- la production d'une analyse critique croisant ces deux jeux de données permettant de trancher la question de la faisabilité d'un développement d'indicateur phytoplancton pour ces masses d'eau et/ou de proposer, dans la négative, les recommandations et acquisitions de données supplémentaires à mettre en œuvre pour ultérieurement pouvoir développer cet indicateur.

L'objectif de ce rapport est de présenter les résultats obtenus dans le cadre de la réalisation du projet EAUYAPOC-Faisabilité, en particulier les analyses critiques des données phytoplanctoniques et des données physico-chimiques, et de conclure avec un chapitre de préconisations afin de guider au mieux le suivi des grands cours d'eau (GCE).

II. Description et analyse des données disponibles

II.1 Les stations suivies

L'acquisition des données nécessaires à la réalisation de cette étude s'est basée sur une liste de stations concernées par le suivi du phytoplancton. Sur la période 2016-2021, le suivi phytoplanctonique a concerné 11 stations (Tableau 1). Ces stations sont localisées le long de plusieurs fleuves guyanais : à l'ouest du territoire, le Maroni (4 stations), la Mana (2 stations) et l'Iracoubo (1 station), et plus à l'est, le Mahury (2 stations), l'Approuague et l'Oyapock (chacun 1 station) (Figure 1). Les cours d'eau situés dans les secteurs à l'est et ceux les plus proches de la frontière avec le Suriname, comme le Maroni, sont les plus susceptibles d'être concernés par une pression d'orpaillage.

Tableau 1 Liste des stations. Les dénombrements d'OPC en bleu précisent les prélèvements effectués en 2008 (2009 pour CACV). Toutes les stations appartiennent au Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS). Certaines de ces stations sont considérées comme des « références », malgré les pressions subies. La colonne « Statut » renseigne sur ces stations de référence (Réf.). OPC Opération de Contrôle (couple « station x date »).

Code Sandre	Code	Station	Bassin versant	Nombre d'OPC	Statut
9280106	TWEN	Twenké	Maroni	5 +1	-
9280107	PAPA	Papaïchton	Maroni	5 +1	-
9280108	LANG	Langatabiki	Maroni	5 +1	-
9180101	APAT	Aval Apatou	Maroni	5	-
9280202	LEZA	Saut Lézard	Mana	3	-
9180209	ANGO	Angoulème	Mana	5	-
9160501	PATA	Patagaï	Iracoubo	3	Réf.
9271503	ATHA	Athanase	Approuague	4 +1	-
9281704	FOUR	Fourmi	Oyapock	4 +1	Réf.
9151217	DEGC	Dégrad Corrèze	Mahury	3	-
9171201	CACV	Cacao Aval	Mahury	1 +1	-

Les données phytoplanctoniques ont été collectées auprès de l'Office de l'Eau de Guyane, commanditaire du suivi hydrobiologie pour ce territoire. L'étude de faisabilité a porté sur les données phytoplanctoniques disponibles en avril 2023. Nous avons donc acquis des données pour 5 années de suivi comprises entre 2016 et 2021, l'année 2018 n'ayant pas fait l'objet d'un suivi du phytoplancton en Guyane (Tableau 2). Le suivi est réalisé une fois par an, pendant la saison sèche, soit entre septembre et décembre, sur 6 à 10 stations selon les années. La fréquence de suivi d'une station dépend principalement du statut de la station (Tableau 2).

Ainsi, certaines stations disposent d'un suivi sur 5 ans (Angoulème, Lagatabiki, Papaïchton et Twenké), tandis que d'autres ont été prélevées plus occasionnellement,

comme Cacao Aval pour laquelle seule une campagne a été réalisée. La base de données bancarisées pour cette étude contient ainsi un effectif de 43 opérations de

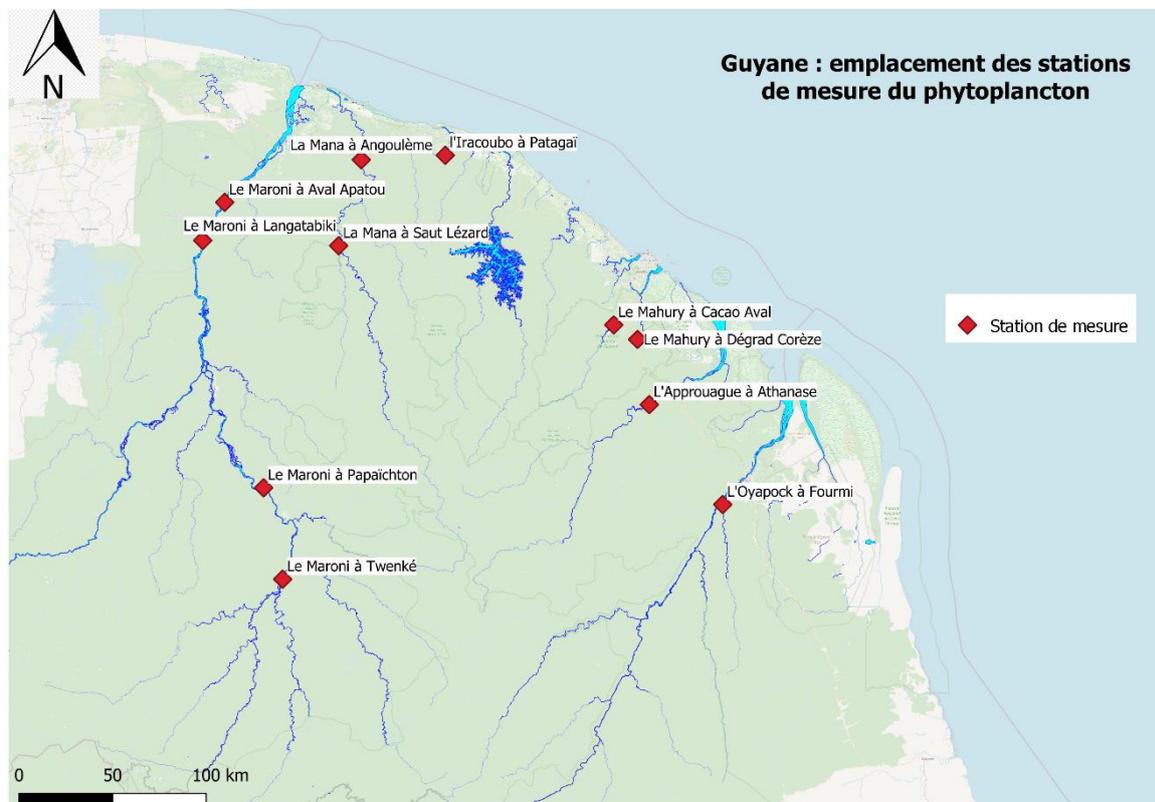


Figure 1 Localisation des 11 stations concernées par un suivi des communautés phytoplanctoniques. contrôle (couples « station x date » ; OPC) pour le phytoplancton en Guyane.

Ces OPC ont été complétées par 6 OPC supplémentaires réalisées en 2008 (et une en février 2009). En effet, une étude préliminaire des communautés phytoplanctoniques guyanaises retrouvées dans les GCE a été réalisée en 2008 afin d'affiner la sélection des stations à suivre, en particulier en éliminant les stations dont la communauté peut montrer des signes d'une influence marine pour les stations les plus proches de l'estuaire de leur cours d'eau (DIREN Guyane 2009, 2010).

La station Dégrad Corrèze est un cas particulier dans notre jeu de données, car cette station remplace la station Orpailleurs, inactive depuis 2016. La station Dégrad Corrèze se situe en aval à quelques centaines de mètres de l'ancienne station. Cet échange de stations a été réalisé à l'occasion du redécoupage des masses d'eau du bassin initié par la DGTM Guyane afin de mieux prendre en compte les pressions locales (route et rejets).

Le jeu de données final inclut donc un total de 49 OPC pour le suivi phytoplanctonique (Tableau 2 et Figure 2).

Tableau 2 Détails de la réalisation des prélèvements phytoplanctoniques. L'étude préliminaire de 2008 a été menée sur un groupe de stations incluant d'autres stations que les 11 de notre étude. Les stations communes entre les deux jeux de données sont indiquées entre parenthèses pour 2008.

Année de suivi	Société (prélèvement)	Société (analyse taxonomique)	Nombre de stations suivies
2008	Hydreco	Asconit	19 (dont 6 communes)
2016	Hydreco	Asconit	8
2017	Hydreco	Sylvain Coulon	6
2018	Pas de suivis		
2019	Hydreco	Artemis	10
2020	Hydreco	Artemis	10
2021	Hydreco	Artemis	9

Le suivi de la physico-chimie des stations correspond généralement au suivi phytoplanctonique, c'est-à-dire que les prélèvements d'eau, par exemple, sont réalisés le même jour que les prélèvements biologiques (Figure 2). Certaines stations ont néanmoins pu bénéficier de suivis plus fréquents, par exemple les stations Angoulême et Dégrad Corrèze en 2022. Les principaux paramètres chimiques concernés par ces campagnes de mesures sont les éléments majeurs (ions) et les nutriments (formes de l'azote, du phosphore et matières organiques). Les données pour les micropolluants ne sont disponibles que pour deux stations.

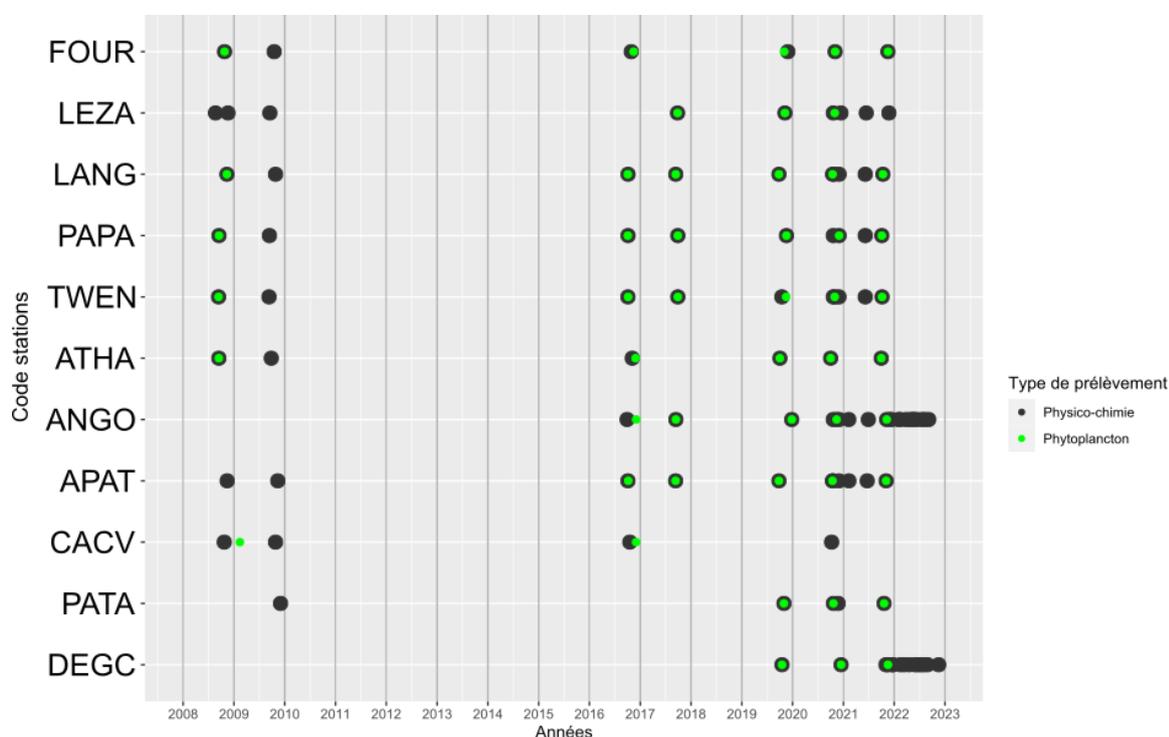


Figure 2 Représentation synthétique des dates des campagnes de prélèvements physico-chimiques (en noir) et phytoplanctoniques (en vert). Un point = un prélèvement. Les prélèvements auparavant effectués sur la station Orpailleur sont représentés pour la station Dégrad Corrèze. Cette figure est inspirée d'une figure de Carayon et al. (2019).

L'objectif de cette section est d'analyser les données physico-chimiques disponibles afin de caractériser le jeu de données, la physico-chimie des stations, ainsi que les différences pouvant exister entre les stations. Pour cela nous avons associé une campagne de mesures physico-chimiques à chaque campagne de prélèvements phytoplanctoniques, sur la base de la campagne de mesures la plus proche dans le temps. Un décalage important existe entre les deux campagnes pour une station prélevée tardivement : la communauté phytoplanctonique de Cacao Aval a uniquement été prélevée en février 2009, alors que les mesures physico-chimiques sont intervenues en octobre 2008 (Figure 2).

Des mesures sont ainsi disponibles pour 23 paramètres pour quasiment toutes les campagnes de prélèvements phytoplanctoniques (Tableau 3). Seules 11 mesures ne sont pas disponibles pour les stations prélevées en 2008, et il s'agit de mesures de la turbidité, du pH et une mesure de la DBO5 (Tableau 3).

Tableau 3 Liste des paramètres physico-chimiques mesurés dans les 11 stations suivies. Les étoiles précisent les paramètres pour lesquels l'intégralité des mesures n'est pas disponible. LQ Limite de Quantification.

Code Sandre	Paramètre	Nombre de mesures	Nombre de mesures égales à la LQ
1301	Température	49	2
1302	pH	45*	0
1303	Conductivité	49	0
1305	Matières en suspension	49	2
6498	Turbidité	43*	0
1311	Oxygène dissous	49	0
1312	Taux de saturation en O ₂	49	0
1313	DBO5 à 20°C	48*	19
1319	Azote Kjeldahl	49	32
1335	Ammonium	49	44
1339	Nitrites	49	49
1340	Nitrates	49	9
1350	Phosphore total	49	7
1433	Orthophosphates	49	49
1337	Chlorures	49	0
1338	Sulfates	49	8
1372	Magnésium	49	15
1374	Calcium	49	4
1345	Dureté totale	49	10
1347	Titre alcalimétrique complet	49	1
1436	Phéopigments	49	34
1439	Chlorophylle-a	49	25
1841	Carbone Organique (dissous)	49	0

II.1.1 Comparaison des valeurs observées en Guyane et en métropole

Pour étudier les valeurs guyanaises nous avons décidé de commencer par les comparer, pour certains paramètres d'intérêt, aux distributions observées dans les GCE métropolitains (Figure 3). Notre hypothèse était ici que les GCE guyanais présentent des conditions plus oligotrophes que ce qui est observé en métropole. C'est ce qui effectivement observé pour les nitrates, mais les concentrations en phosphore total et en azote Kjeldahl sont similaires, même si les valeurs guyanaises sont légèrement plus faibles. Une différence marquée est aussi observée pour les concentrations en chlorophylle-a entre les valeurs guyanaises et métropolitaines, avec des valeurs clairement inférieures observées en Guyane, avec quasiment l'intégralité des valeurs inférieures à 5 µg/L.

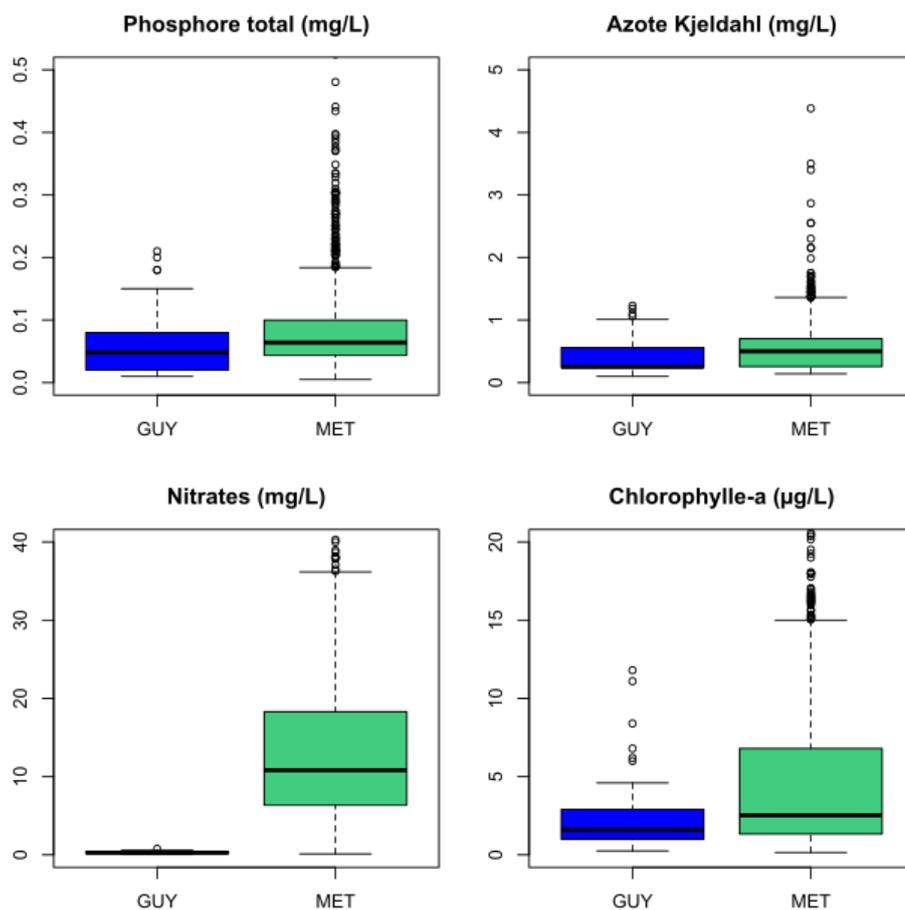


Figure 3 Distributions des valeurs de quatre paramètres d'intérêt en Guyane (GUY ; en bleu) et en France métropolitaine (MET ; en vert). Les distributions des valeurs observées en métropole peuvent être tronquées. N = 49 pour la Guyane, N = 963 pour la métropole (données GCE bancarisées pour le développement de l'IPHYGE).

En métropole les concentrations en chlorophylle-a sont expliquées, entre autres, par le phosphore total (Meyer et al. 2023). Ici, les concentrations guyanaises et métropolitaines en phosphore total sont similaires, mais les concentrations en

chlorophylle-a sont nettement inférieures en Guyane, ce qui met en évidence que la biomasse phytoplanctonique est probablement limitée par d'autres facteurs, comme par exemple la turbidité.

II.1.2 Variations des principaux paramètres en fonction des stations et années

La Figure 4 montre la distribution des valeurs mesurées pour les 23 paramètres et pour le biovolume total pour les 49 OPC effectuées dans les 11 stations. Trois stations semblent présenter des caractéristiques particulières. D'une part, les stations de la Mana, c'est-à-dire ANGO et LEZA, présentent des valeurs plus élevées pour un certain nombre de paramètres que celles observées dans les autres stations : par exemple, les concentrations en nitrates et sulfates, la conductivité, la turbidité et les matières en suspension. D'autre part, la station PATA, localisée sur l'Iracoubo, présente des caractéristiques très singulières, avec surtout un pH acide, proche de 5,5 en moyenne pour les trois mesures disponibles. Cette particularité semble influencer d'autres paramètres, avec entre autres des valeurs plus faibles observées pour le TAC, les concentrations en calcium, l'oxygénation de l'eau (oxygène dissous et taux de saturation) et même le phytoplancton (les concentrations en chlorophylle-a et le biovolume total sont plus faibles dans cette station).

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur une sélection de paramètres d'intérêt pouvant indiquer des pressions d'origine anthropique sur la qualité chimique de l'eau des GCE guyanais (Figure 5). Le premier plan factoriel explique 41,5% de l'inertie, avec 23,1% pour l'axe 1 et 18,4% pour l'axe 2.

Le premier axe semble être plutôt expliqué par des valeurs élevées pour l'ammonium, les nitrates, les ions calcium et magnésium, alors que l'axe 2 est corrélé aux concentrations en phosphore total et nitrites. Vu que de nombreuses concentrations sont égales aux LQ pour certains paramètres azotés et phosphorés (Tableau 3), nous pouvons synthétiser les résultats de ce cercle des corrélations avec un axe 1 expliqué par des charges azotées en général (surtout les nitrates) et un axe 2 expliqué par le phosphore (total). Nous pouvons aussi remarquer la double corrélation des matières en suspension et des sulfates avec une augmentation de ces valeurs pour des scores positifs sur l'axe 1 et des scores négatifs sur l'axe 2.

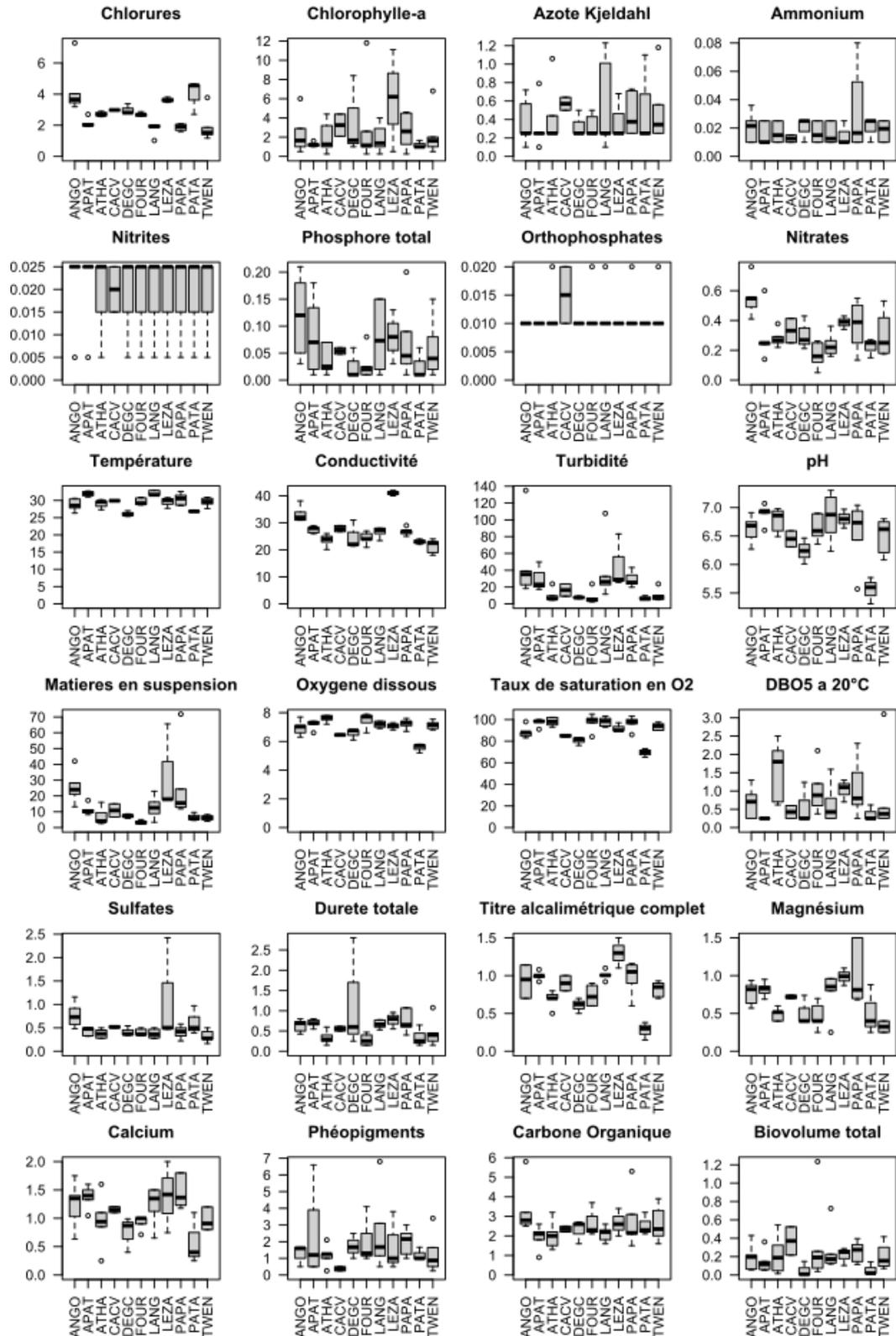


Figure 4 Distribution des valeurs des 23 paramètres physico-chimique, ainsi que du biovolume total, pour les 11 stations suivies. Le nombre de mesure varie en fonction des stations (se référer au Tableau 3).

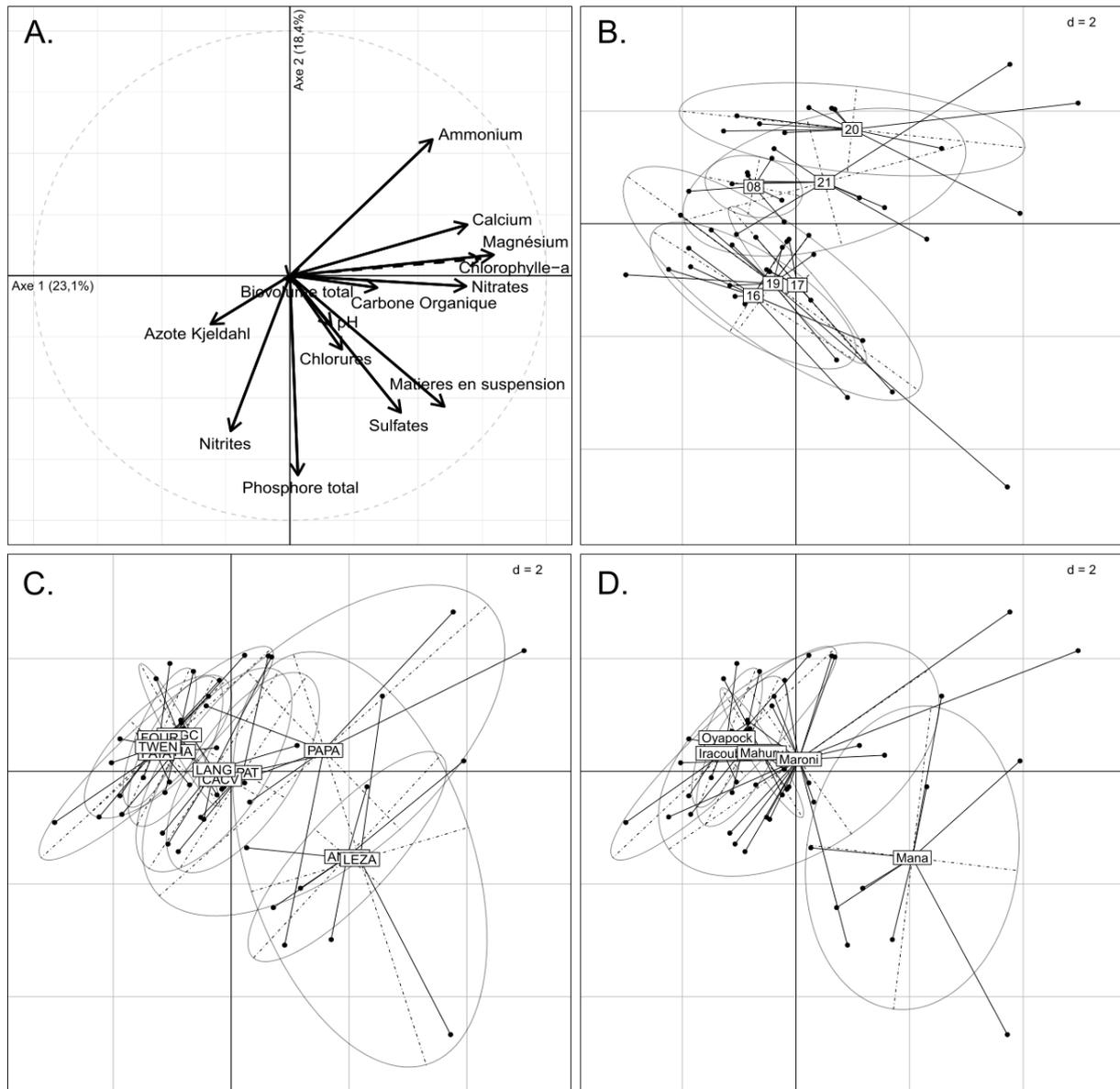


Figure 5 Analyse en Composantes Principales des principaux paramètres pouvant indiquer des pressions anthropiques sur les GCE guyanais. Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Les valeurs manquantes en 2008 et 2009 ont été remplacées par les moyennes des autres mesures. A. Cercle des corrélations. Deux paramètres (chlorophylle-a et le biovolume total) ont été projetés comme des variables supplémentaires sur ce premier plan factoriel. Il s'agit des flèches en pointillés. B, C et D. Projection des coordonnées des OPC sur le premier plan factoriel en fonction de l'année de l'OPC (B.), de la station (C.) ou de la rivière (D.). Un point = une OPC. N = 49. d = taille des cases pour chaque graphique.

Le premier axe semble surtout discriminer les stations entre elles, surtout en fonction de la rivière sur lesquelles ces stations sont localisées : ainsi, l'axe 1 oppose les stations de la Mana (ANGO et LEZA), avec des scores positifs sur l'axe 1, aux stations de la Maroni (TWEN, PAPA, LANG et APAT), avec des scores globalement proches de zéro, et les stations de l'Oyapock (FOUR), du Mahuri (DEGC et CACV) et de l'Approuague (ATHA), avec des scores négatifs sur l'axe 1. L'axe 2 semble plutôt opposer les OPC en fonction des années, avec les OPC réalisées en 2008, 2020 et

2021 présentant des scores positifs sur cet axe, alors que les OPC réalisées les autres années (en 2016, 2017 et 2019) présentent des scores négatifs sur cet axe. L'hydrologie particulière observée en 2020 et 2021, caractérisée par une pluviométrie importante, pourrait expliquer la position de ces deux années le long de cet axe 2 (voir la section suivante, §II.2). L'axe 2 met aussi en exergue les stations de la Mana, avec des scores négatifs sur cet axe, *a contrario* des scores positifs pour les autres stations et rivières.

En combinant l'analyse du cercle des corrélations et celle de la projection des OPC sur le premier plan factoriel, nous pouvons identifier un potentiel « axe » de dégradation de la qualité physico-chimique des GCE guyanais le long de la diagonale allant du cadran en haut à gauche ($F1 < 0$ et $F2 > 0$) vers le cadran en bas à droite ($F1 > 0$ et $F2 < 0$), avec un gradient allant de la Mana comme la rivière la plus dégradée, avec le Maroni dans une situation intermédiaire, et les autres cours d'eau (Oyapock, Mahury et Approuague) potentiellement peu ou pas impactés par des activités d'origine anthropique. Nous pouvons cependant remarquer que la position intermédiaire du Maroni sur ce gradient de dégradation est surtout expliqué par les scores positifs le long de l'axe 1 pour les OPC de PAPA. Ce gradient est globalement confirmé par les réseaux de suivis auxquels appartiennent les stations (Figure 6), avec les stations du réseau de référence localisées au début du gradient, avec des négatifs le long de l'axe 1 et des scores positifs le long de l'axe 2, alors que les stations du réseau de surveillance sont localisées plus loin le long de ce gradient.

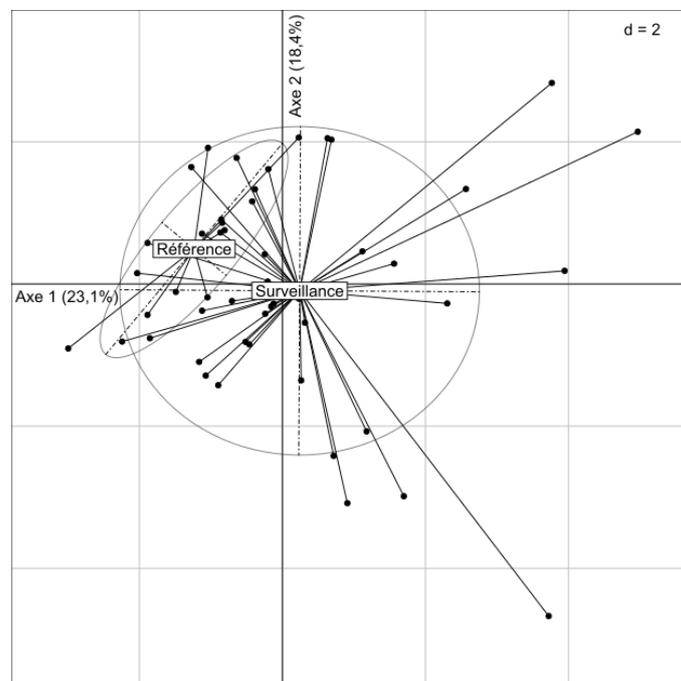


Figure 6 Projection des coordonnées des OPC sur le premier plan factoriel en fonction du réseau de suivi des stations (cf. Figure 3). Un point = une OPC. $N = 49$. $d =$ taille des cases pour chaque graphique.

II.2 Les données météorologiques

Des données de pluviométrie ont été acquises à partir des données disponibles via Infoclimat.fr. Des mesures de cumuls mensuels et annuels de précipitation (mm) étaient disponibles pour 4 stations météorologiques localisées en Guyane. Ces données ont été associées aux stations de notre jeu de données en leur associant les valeurs disponibles pour la station météorologique la plus proche. Pour les prélèvements phytoplanctoniques nous leur avons associé le cumul mensuel du mois précédent le prélèvement si le prélèvement avait été effectué avant le 15 du mois en cours. Malheureusement les données de pluviométrie n'ont pas pu être récupérées pour les prélèvements effectués en 2008.

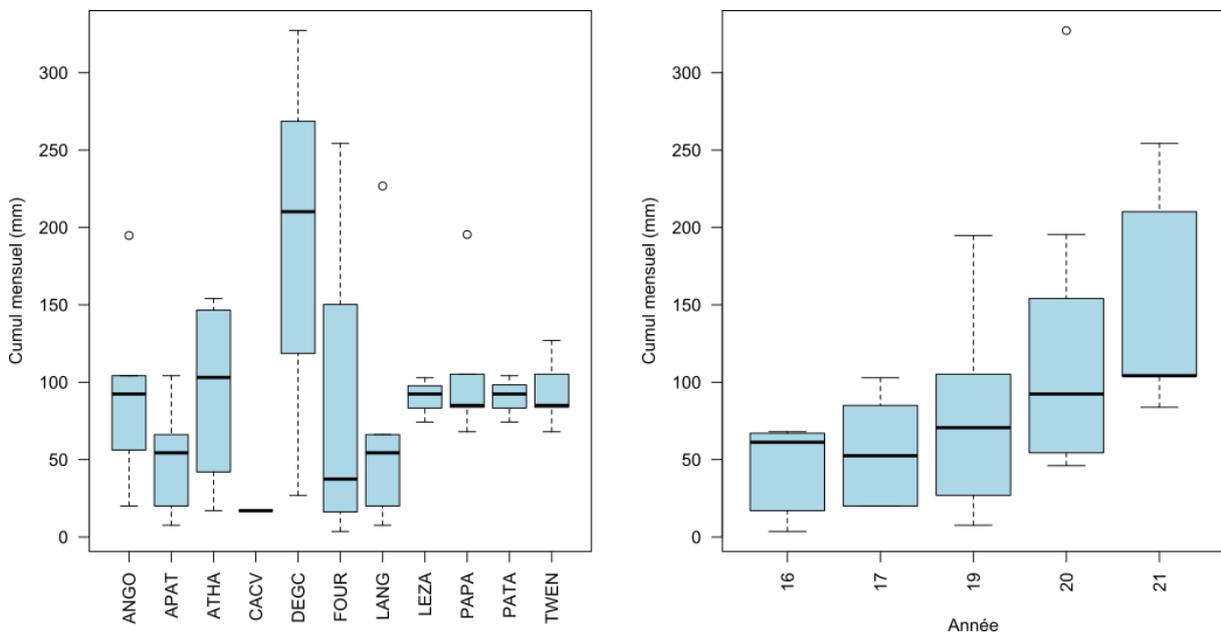


Figure 7 Distribution des valeurs de cumuls mensuels de précipitations associées aux prélèvements phytoplanctoniques réalisés après 2016, en fonction de la station (à gauche) ou de l'année de réalisation du prélèvement (à droite).

Les mesures bancarisées sont globalement comprises entre 50 et 150 mm de cumuls de précipitations pour les différentes stations (Figure 7). Ces valeurs sont cohérentes avec le fait que les prélèvements phytoplanctoniques sont réalisés en période d'étiage. En effet, en dehors de ces période d'étiage la pluviométrie peut dépasser plus d'un mètre de cumul mensuel (cf. autres données d'Infoclimat.fr).

La pluviométrie semble plus importante pour la station DEGC, mais cela s'explique par le fait que les deux seuls prélèvements phytoplanctoniques réalisés sur cette station l'ont été en 2020 et 2021 (cf. Figure 3), alors que les valeurs de pluviométrie étaient plus élevées ces deux années (à droite sur la Figure 7). Il existe des différences de pluviométrie entre les différentes années, avec une augmentation des cumuls mensuels de 2016 à 2021.

II.3 Les données de pressions anthropiques

Un tableau décrivant les principales pressions anthropiques impactant les 11 stations suivies nous a été fourni par l'OEG (Annexes, Tableau S1). Ce tableau a été simplifié, en shuntant les pressions qui n'étaient pas significatives ou tout simplement absentes pour l'ensemble des 11 stations.

L'intégralité des pressions étaient décrites selon la significativité de la pression (ie. « Significative », « Non significative » ou « Absente »). Pour certaines pressions, le niveau de pression, de « Minimale », « Modérée », à « Élevée », était aussi décrit. Lorsque cette caractérisation était disponible, elle a été préférée à la description du caractère significatif de la pression. Dans un souci d'homogénéisation de ce jeu de données avant tout traitement statistique, le caractère significatif et les niveaux de pressions ont été recodés de la manière suivante :

- (i) pour le caractère significatif « Absente » ou « Non significative », pour le niveau de pression « Minimale », et pour un rare cas de « A expertiser » → 0 ;
- (ii) pour le niveau « Modérée » → 1 ;
- (iii) pour le caractère significatif « Significative » et le niveau « Élevée » → 2.

Le tableau ainsi obtenu est le Tableau 4. Les valeurs obtenues ont été additionnées afin d'estimer le niveau de dégradation de la station par les activités anthropiques décrites. Nous avons ainsi défini arbitrairement trois niveaux de dégradation : pour les sommes égales ou inférieures à 2, nous avons considéré que la station était peu ou pas impactée ; pour une somme comprise entre 3 et 6 inclus, la station était modérément impactée ; et pour une somme strictement supérieure à 6, la station était très impactée.

Cette caractérisation des pressions reste préliminaire et sommaire, car limitée par le jeu de données disponible et par sa précision. Dans le futur, cette caractérisation pourra être affinée, en shuntant par exemple les pressions qui peuvent peu ou pas impacter le phytoplancton (par exemple les pressions hydromorphologiques). Dans la mesure du possible, et en fonction des pressions, cette caractérisation devrait être quantitative, au lieu d'une simple description qualitative.

Malgré ces limites, nous avons choisi de nous baser sur cette première évaluation des pressions afin de caractériser les différences de pressions observées pour les différentes stations. Une matrice de distance de Gower a été calculée entre chaque couple de stations, avant d'être utilisée pour construire un dendrogramme grâce à l'algorithme de Ward (Figure 8). Les groupes de stations observés sur le dendrogramme ainsi construit confirment les niveaux de dégradation que nous avons précédemment défini : les stations peu ou pas impactées, en vert, sont regroupées ensembles dans la branche à droite, alors que les stations très impactées se retrouvent groupées ensembles dans la branche à gauche.

Tableau 4 Description des niveaux de pressions impactant les stations suivies. PI = station peu ou pas impactée (somme ≤ 2), MI = station modérément impactée (3 ≤ somme ≤ 6), TI = station très impactée (somme ≥ 7).

Station	Pressions											Statut
	Déchets	Prélèvements	Carrière	Aurifère	Agricole (azote)	Agricole (phytosanitaire)	Pêche	Continuité hydrologique	Hydrologie	Hydromorphologie	Somme	
TWEN	0	0	0	2	0	0	1	1	0	0	4	MI
PAPA	2	0	0	2	0	1	2	0	0	2	9	TI
LANG	0	0	0	2	0	0	2	1	0	2	7	TI
APAT	0	0	0	2	0	0	2	1	0	2	7	TI
LEZA	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	PI
ANGO	0	0	2	0	1	2	1	0	0	0	6	MI
PATA	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	PI
ATHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	PI
FOUR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	PI
DEGC	0	0	0	2	0	1	1	0	0	1	5	MI
CACV	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	PI

Nous pouvons aussi remarquer la concordance entre le statut de référence des stations FOUR et PATA (Tableau 1) et le statut observé ici avec notre classement simplifié pour le niveau de comparaison (Tableau 4). La comparaison du gradient obtenu ici et du gradient de dégradation observé sur l'ACP des données physico-chimiques (Figure 5) montre cependant une certaine discordance, mais c'est somme toute logique car l'ACP a été réalisée sur un sous-ensemble de paramètres physico-chimiques qui ne permettent pas forcément de mettre en évidence toutes les dégradations d'origine anthropique, surtout si celles-ci altèrent plutôt l'hydromorphologie et le fonctionnement hydrologique des cours d'eau.

La caractérisation des niveaux de dégradation présentés dans le Tableau 4 et sur la Figure 8 a permis de définir deux groupes de stations. Un premier groupe de stations regroupe les stations peu ou pas impactées du Tableau 4 (en vert sur la Figure 8), et ce groupe correspond au groupe des LIRR (« Least Impaired River Reaches »). Le second groupe regroupe les stations modérément ou très impactées du Tableau 4 (en orange ou rouge sur la Figure 8) et ce groupe correspond au groupe des IRR (« Impaired River Reaches »). Les discussions ayant eu lieu lors du dernier comité de pilotage de ce projet ont permis de mettre en évidence que le statut LIRR ne devrait pas être attribué à la station LEZA, car cette station, localisée sur la Mana, est impactée par des activités anthropiques, comme l'orpaillage.

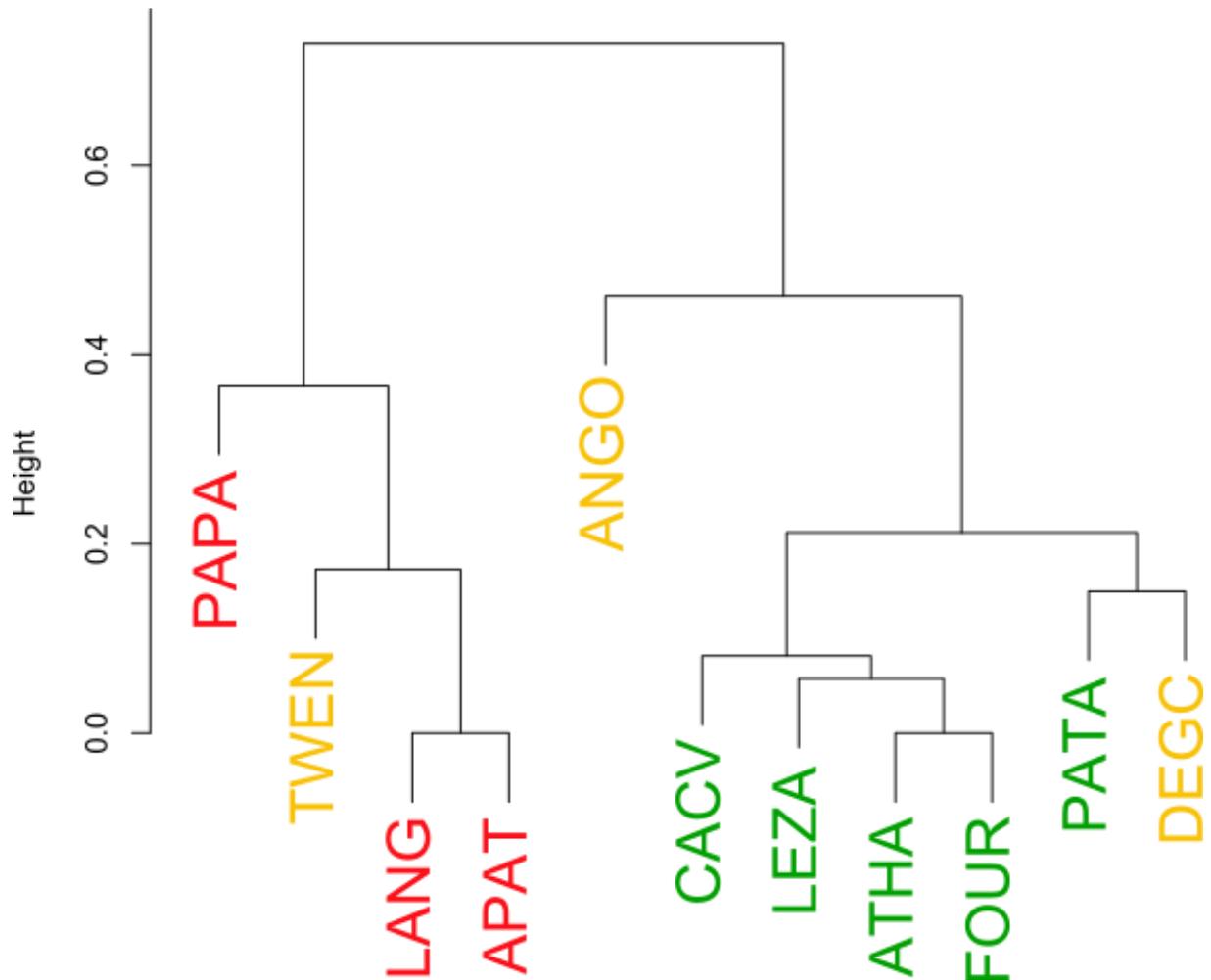


Figure 8 Dendrogramme des stations en fonction des pressions observées et de leur niveau (cf. Tableau 4). Ce dendrogramme a été construit grâce à un algorithme de Ward appliqué à une matrice de distance de Gower. Les couleurs correspondent au niveau de dégradation (cf. Tableau 4).

Ainsi, au final, les groupes de stations sont les suivants :

- pour les LIRR : CACV, ATHA, FOUR et PATA ;
- pour les IRR : PAPA, TWEN, LANG, APAT, ANGO, LEZA et DEGC.

Ces regroupements nous permettront par la suite de caractériser l'efficacité des métriques et méthodes étudiées à discriminer entre ces deux niveaux d'impacts d'origine anthropique (cf. section §III).

II.4 Les données phytoplanctoniques

Des données phytoplanctoniques sont disponibles pour un total de 49 OPC, dont 6 OPC réalisées en 2008 et 2009 et 43 OPC réalisées durant la période 2016-2021. Pour les 6 premières OPC seules des données d'abondance sont disponibles, alors que les valeurs des biovolumes et d'abondances sont disponibles pour les 43 OPC.

Pour réaliser les analyses de ce jeu de données nous avons choisi de travailler uniquement avec les valeurs de biovolume. Ces valeurs sont généralement considérées comme plus pertinentes que les abondances dans l'étude de la structure des communautés phytoplanctoniques, car elles sont plus représentatives de l'importance relative, vu par le prisme des biomasses, des taxons observés. Il a donc été nécessaire de recalculer les valeurs de biovolume pour les prélèvements effectués en 2008 et 2009. Pour cela, les valeurs de référence de biovolume par cellule utilisées étaient celles disponibles dans Phytobs¹.

Les biovolumes ont été additionnés au niveau des genres, afin d'essayer de limiter l'éventuel effet opérateur et/ou les « erreurs » de détermination liées à un manque de recul sur la taxonomie des taxons guyanais. Au départ le jeu de données phytoplanctoniques incluait 327 taxons. Après cette phase d'agrégation des biovolumes le jeu de données phytoplanctoniques incluait 175 genres. Pour information, les taxons identifiés au niveau spécifique représentaient en moyenne 53% des taxons identifiés dans chacune des 49 OPC.

Les résultats d'une analyse factorielle des correspondances (AFC) de ce jeu de données phytoplanctoniques sont présentés sur les Figures 9 et 10. Le premier plan factoriel explique environ 19% de l'inertie, avec une répartition relativement équilibrée entre les deux axes, avec respectivement 10,7% et 8,1% de l'inertie expliqué par chaque axe.

Deux gradients ressortent de l'étude de cette figure et du premier plan factoriel. Un premier gradient oppose les prélèvements de 2008 aux autres prélèvements. Ce premier résultat montre que ces prélèvements présentent une structure (i.e. composition et biovolumes) particulière de leurs communautés phytoplanctoniques, clairement différente de celle observée les autres années. Cette différence semble être expliquée par une importance relative plus accrue pour les diatomées (les Bacillariophyta sur la Figure 10) et plus faible pour les algues vertes (Chlorophyta ; Figure 10). Cette observation remet en cause l'utilisation de ces données de 2008 au sein d'un jeu de données constitué pour le développement d'une méthode phytoplanctonique pour les GCE guyanais. En effet, cette structure différente pourrait être à l'origine d'un biais, au détriment des performances de la méthode développée.

¹ Site web : <https://hydrobio-dce.hub.inrae.fr/telecharger/logiciels/phytobs>

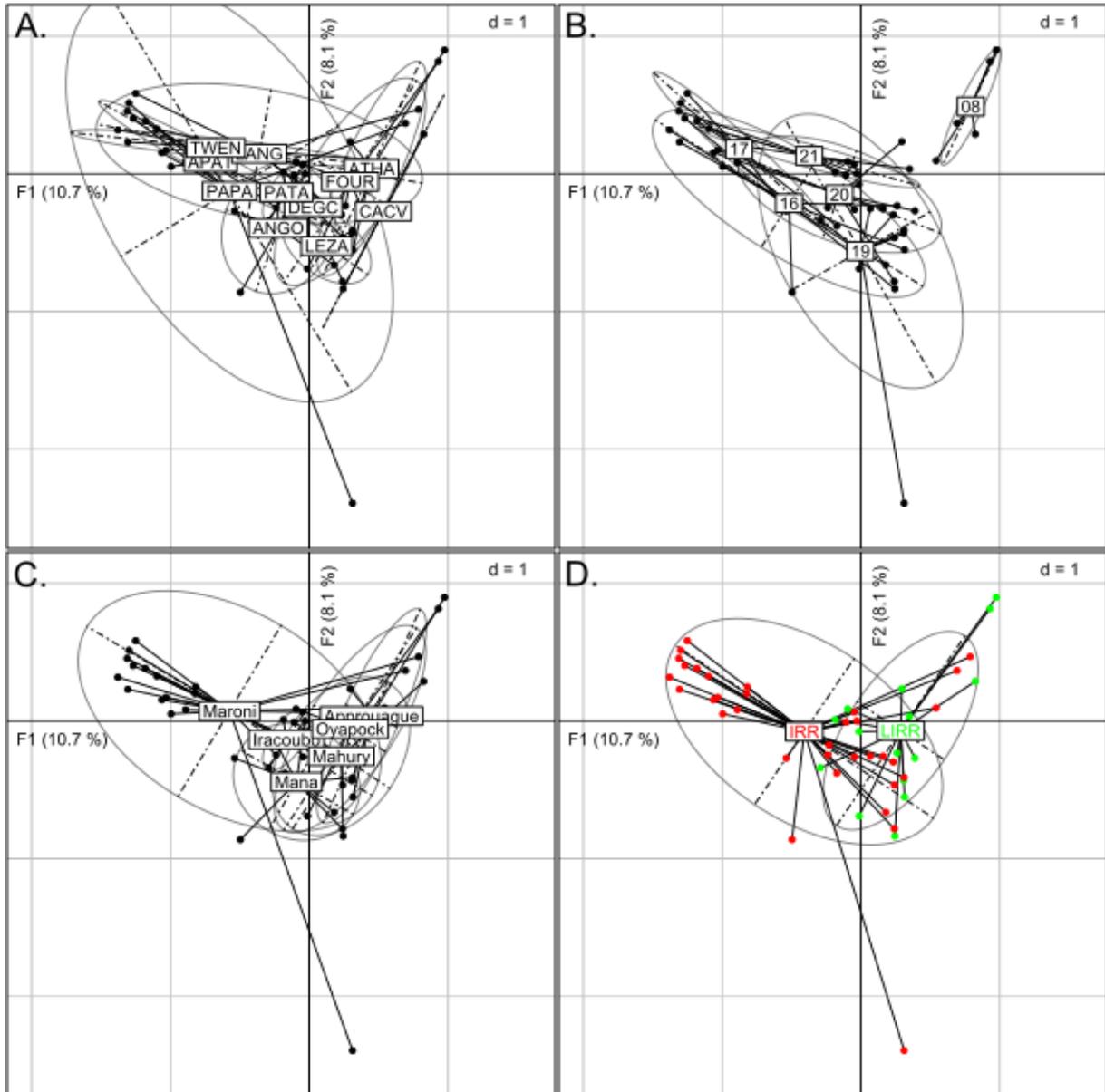


Figure 9 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Projections des OPC sur le premier plan factoriel en fonction de leur station (A.), de l'année (B.), du cours d'eau (C.) ou du statut LIRR/IRR (D. ; cf. §II.3). Un point = une OPC. N = 49. d = taille des cases pour chaque graphique.

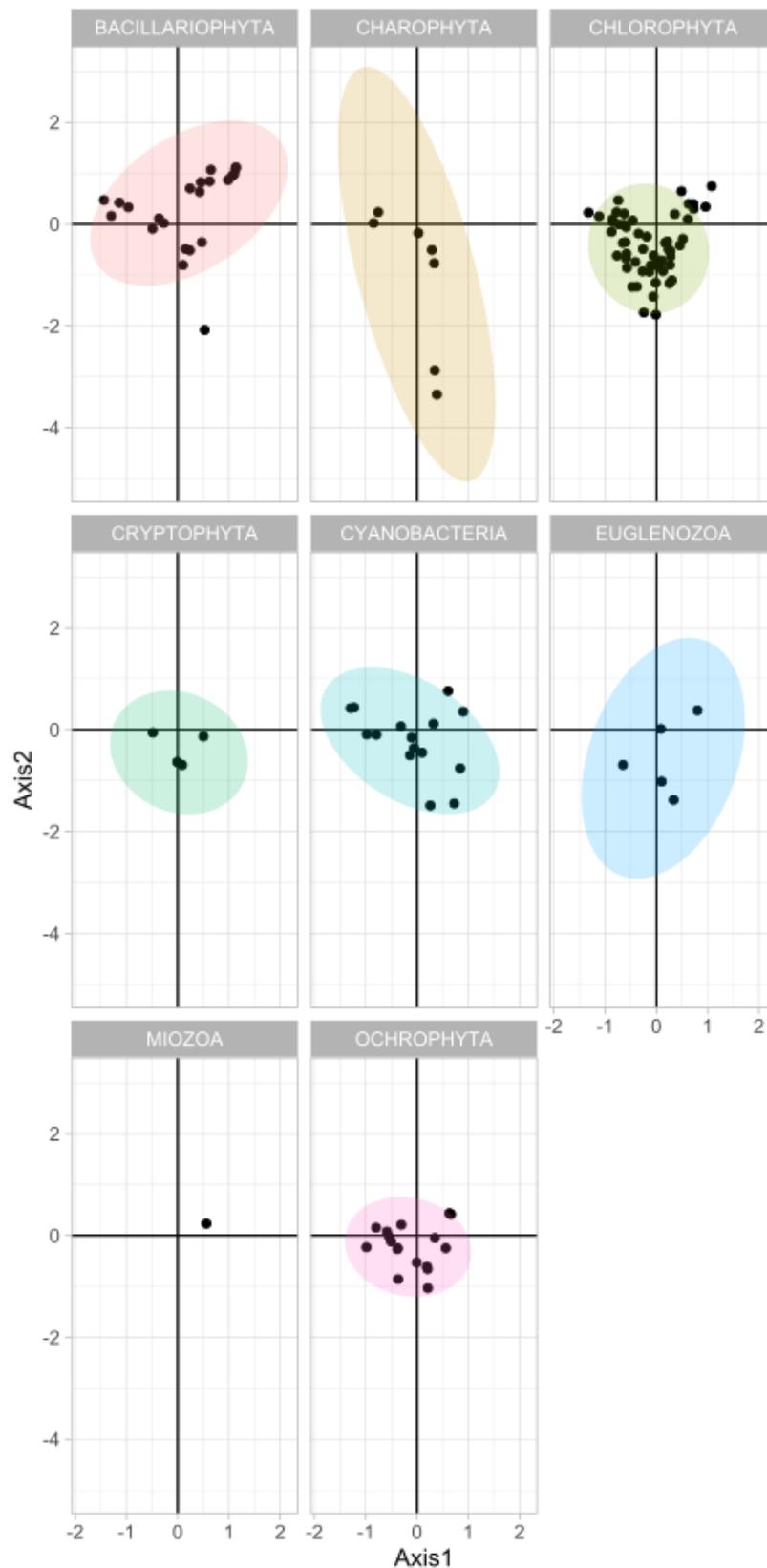


Figure 10 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les projections des genres sur le premier plan factoriel en fonction de leur embranchement. Un point = un genre. S = 127 genres.

Le deuxième gradient qui ressort sur la Figure 9 est celui qui oppose les OPC réalisées sur les LIRR (avec des scores positifs sur l'axe 1) à celles réalisées sur les IRR (avec des scores négatifs sur l'axe 1) (Figure 9D). Ce gradient est intéressant, car il aurait pu permettre de mettre en évidence une différence marquée entre les structures des communautés phytoplanctoniques observées dans les situations peu ou pas impactées de celles observées dans des situations plus impactées. Malheureusement, la Figure 9C met en évidence que l'opposition de certaines OPC le long du premier axe semble aussi fortement liée au cours d'eau sur lesquels ont été réalisés les prélèvements phytoplanctoniques : le premier axe oppose ainsi les OPC réalisés sur le Maroni, avec des scores négatifs, aux OPC réalisés sur les autres cours d'eau, possiblement expliquée par une plus grande importance relative des algues vertes et peut-être aussi des Ochrophytes dans les communautés observées dans le Maroni (Figure 10). Ainsi, il est difficile de savoir si les OPC du Maroni se distinguent des autres OPC de par une structure particulière de leur communauté phytoplanctonique (expliquée, par exemple, par des particularités biogéographiques du bassin versant) ou par un impact plus important des activités humaines sur ces communautés. Les discussions lors du dernier comité de pilotage ont permis de conclure que les impacts des activités humaines sont en effet non-négligeables et potentiellement en progression pour ce cours d'eau. Le développement d'une méthode phytoplanctonique spécifique aux GCE guyanais devra donc prendre en compte cet état de fait, afin d'éviter tout biais. L'identification de stations de référence localisées sur le Maroni pourrait permettre de pallier à ce problème. Nous reviendrons sur ce point dans la section consacrée aux préconisations (cf. section §IV).

Une dernière figure a été réalisée à partir des résultats de l'AFC afin d'estimer si la pluviométrie pouvait être un facteur confondant de la structure des communautés phytoplanctoniques observées dans les GCE guyanais (Figure 11). Cette dernière analyse n'a pas permis de mettre en évidence un effet marquée de la pluviométrie sur la structure des communautés observées, malgré les variations interannuelles de pluviométrie (Figure 5B) et les potentielles effets de ces variations sur la physico-chimie de l'eau (Figure 7).

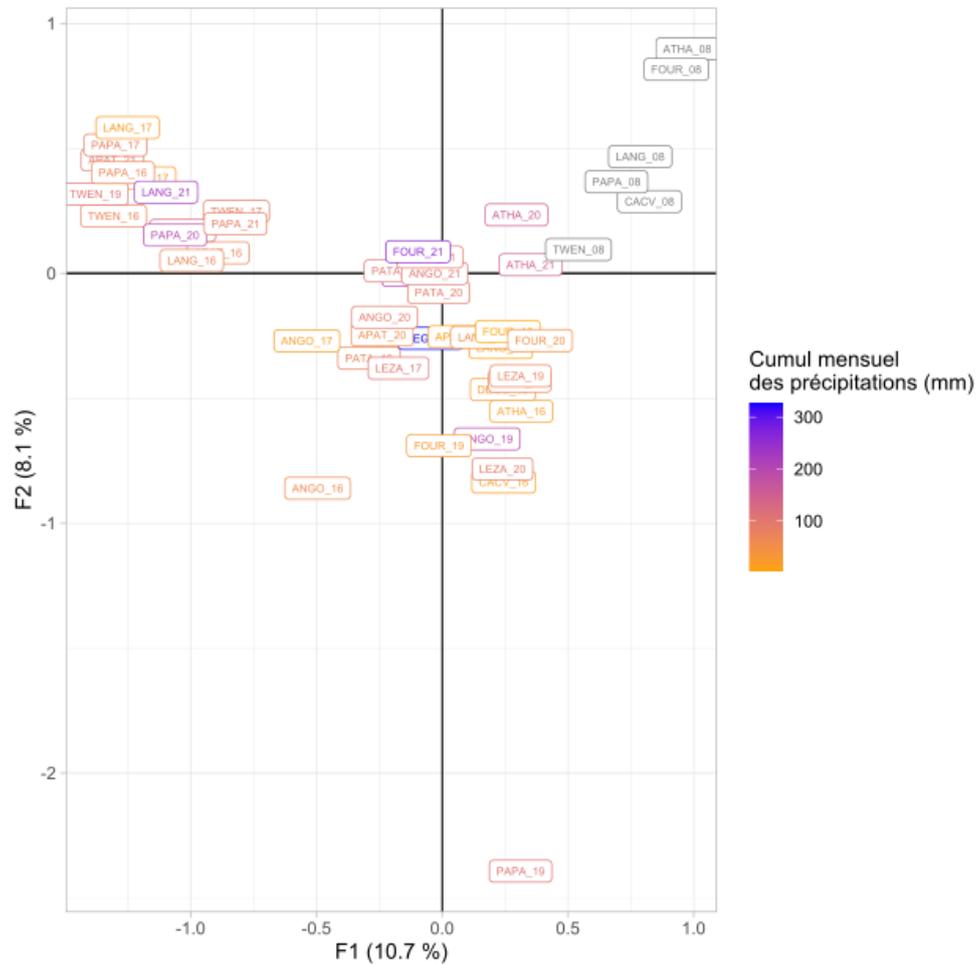


Figure 11 Analyse Factorielle des Correspondances des prélèvements phytoplanctoniques, exprimés en biovolumes log-transformés par genre et à l'exclusion des genres rares (observés uniquement dans une OPC). Sont ici présentés les résultats obtenus pour le premier plan factoriel. Projections des OPC sur le premier plan factoriel. Les couleurs des étiquettes renseignent sur le cumul mensuel des précipitations, avec des étiquettes en gris pour les valeurs manquantes (i.e. pour 2008). N = 49 OPC.

III. Exploration des performances de métriques décrivant les communautés phytoplanctoniques

III.1 Description des métriques calculées

III.1.1 Les métriques de biomasse

L'annexe 5 de la DCE précise qu'une méthode phytoplanctonique doit être capable de mettre en évidence (i) la fréquence et l'intensité des efflorescences algales, et (ii) une biomasse phytoplanctonique cohérente avec ce qui est normalement observée pour le type de masse d'eau considéré. Pour répondre à ce critère, les méthodes phytoplanctoniques incluent toutes une métrique de biomasse algale phytoplanctonique (Mischke et al. 2016, Meyer et al. 2021), dont la valeur est généralement calculée à partir d'un des proxys mesurables, c'est-à-dire l'abondance totale, le biovolume total ou les concentrations en chlorophylle-a.

Des valeurs ont été calculées à partir des données disponibles pour quatre métriques de biomasse. Respectivement, les valeurs de ces métriques sont égales aux concentrations en chlorophylle-a, à la somme des concentrations en chlorophylle-a et en phéopigments, aux abondances totales et aux biovolumes totaux.

III.1.2 Les métriques structurelles

Les valeurs des métriques structurelles sont calculées sur la base de la structure (composition et abondances/biovolumes) des communautés phytoplanctoniques. Il s'agit de métriques décrivant la richesse et la diversité taxonomique, dont les valeurs ont été calculées sur la base du jeu de données phytoplanctoniques incluant les biovolumes par genre et par OPC.

Les métriques suivantes ont été calculées : la richesse taxonomique totale, l'indice de Shannon (Shannon 1948), l'équitabilité de Pielou, l'indice de Simpson. Le log népérien a été utilisé pour les calculs de l'indice de Shannon et de l'équitabilité de Pielou. Les richesses totales et relatives ainsi que les biovolumes totaux et relatifs ont été calculés au niveau de toutes les classes.

III.1.3 Les métriques fonctionnelles

Les valeurs des métriques fonctionnelles ont été calculées sur la base des traits bioécologiques qui ont été décrits pour une partie du phytoplancton français observé en métropole (Derot et al. 2020, Laplace-Treytoure et al. 2021). Ces valeurs ont été calculées sur la base du jeu de données phytoplanctoniques le plus précis, c'est-à-dire incluant les déterminations taxonomiques au niveau spécifique et infra. En effet, l'utilisation et l'étude des traits fonctionnels permet de s'affranchir de la taxonomie, tout

en synthétisant les caractéristiques biologiques et écologiques des communautés phytoplanctoniques, et par extension permet donc de limiter l'effet d'éventuels biais liés à des erreurs de détermination. Une description des traits était disponible pour l'intégralité des taxons observés dans notre jeu de données.

Le calcul des valeurs des métriques fonctionnelles s'est basé sur la base de données de trait ré-encodée lors du développement de l'IPHYGE (Meyer et al. 2023). Pour synthétiser ce ré-encodage, les traits codés à l'origine soit sous la forme de valeurs numériques continues (par ex. pour la taille et le biovolume des individus), soit sous la forme de catégories ou de classes (par ex. des classes de taille allant du « Picophytoplankton » au « Microphytoplankton »), ont été ré-encodés sous la forme d'un codage par « modalité de trait », généralement disjonctif (0 ou 1, selon si la modalité est observée ou non pour un taxon donné), afin de pouvoir bénéficier des scripts de calcul existants permettant de calculer rapidement des métriques descriptives de la structure fonctionnelle des communautés phytoplanctoniques (Meyer et al. 2020).

Des données sont ainsi disponibles pour 23 traits, représentant un total de 101 modalités de traits :

(i) traits morphologiques (N = 12 traits) : "Cell biovolume", "Size classes (Ignatiades)", "Individual biovolume", "Maximal length", "Maximal width", "Minimal length", "Minimal width", "Size classes", "Number of protuberances", "Size of protuberances", "Type of protuberances", "Diverse traits" ;

(ii) mobilité (N = 1 trait) : "Motility" ;

(iii) formes de vie (N = 1 trait) : "Life forms" ;

(iv) traits physiologiques (N = 5 traits) : "Carbon content", "Secondary pigment", "Toxins", "Nutrition", "Number of plasts" ;

(v) traits écologiques (N = 3 traits) : "Tolerance", "Trophy", "Salinity" ;

(vi) reproduction (N = 1 trait) : "Reproduction".

Les valeurs des métriques fonctionnelles suivantes ont été calculées :

- les **fréquences relatives d'utilisation** (« Community Weighted Means » ; CWM) au sein des communautés phytoplanctoniques des 101 modalités des 23 traits bioécologiques (Tachet et al. 2010) ;

- des **indices de diversité fonctionnelle** (par ex. la diversité de Rao ; Rao 1982) basés sur la diversité en traits biologiques simultanément sélectionnés au sein d'une communauté ;

- des indices de **recouvrement** (Pianka 1974) ou de **spécialisation de niche** permettant l'analyse du degré d'homogénéité (ou d'hétérogénéité) et de spécialisation des traits bioécologiques des taxons au sein des communautés phytoplanctoniques (Mondy & Usseglio-Polatera 2014).

III.1.4 Les métriques de l'IPHYGE

L'IPHYGE, pour Indicateur PHYtoplancton pour les Grands cours d'Eau, a été conçu comme un indicateur multimétrique phytoplanctonique pour l'évaluation de l'état écologique des GCE de France métropolitaine (Meyer et al. 2023). La valeur de l'IPHYGE est la moyenne pondérée de quatre métriques : une métrique de biomasse phytoplanctonique, la **MBP**, dont la valeur est calculée à partir des concentrations moyennes et maximales en chlorophylle-a, et trois métriques de composition, dites trophiques, caractérisant les pressions liées aux concentrations en phosphore total (la métrique **MG-P**), en azote Kjeldahl (**MG-A**) et en nitrates (**MS-N**).

Calcul de la métrique MBP

La métrique de biomasse phytoplanctonique (MBP) est calculée à partir des concentrations en chlorophylle-a mesurées durant la période mai-octobre. La formule pour calculer sa valeur est la suivante :

$$MBP = 0,481 \times \ln(chla_{moy}) - 0,172 \times \ln(chla_{max}) + 1,262$$

avec $chla_{moy}$ la moyenne des concentrations en chlorophylle-a mesurées pendant la période mai-octobre et $chla_{max}$ la valeur maximale de ces mesures. Pour pouvoir calculer les valeurs de la MBP avec les données guyanaises, les valeurs $chla_{moy}$ et $chla_{max}$ ont été remplacées par l'unique mesure de chlorophylle-a effectuée pour chaque OPC, donc réalisée généralement pendant la saison sèche, soit entre septembre et décembre.

La valeur de la MBP est ensuite exprimée sous la forme d'un ratio de qualité écologique (Ecological Quality Ratio ; EQR), en utilisant les valeurs de référence établies pour la métropole :

$$MBP_{EQR} = (MBP - 2,488) / (1,250 - 2,488)$$

Calcul des métriques de composition MG-P, MG-A et MS-N

Les valeurs des métriques de composition (MC) sont calculées séparément pour chaque prélèvement phytoplanctonique effectué durant la période mai-octobre sur la base de la formule définie par Zelinka et Marvan (1961) :

$$MC = \sum_i (CS_i \times S_i \times BV_i) / \sum_i (S_i \times BV_i)$$

avec CS_i , la cote spécifique de trophie du taxon i , S_i le coefficient de sténoécie du taxon i , et BV_i le biovolume du taxon i dans un prélèvement donné. Les cotes spécifiques et coefficients de sténoécie propres à chaque métrique sont donnés dans les annexes de [Meyer et al. \(2023\)](#).

Les valeurs de ces métriques de composition sont normalement calculées pour chaque prélèvement de phytoplancton, avant de calculer la moyenne annuelle. Les valeurs de ces métriques ont été calculées pour l'unique prélèvement de phytoplancton de chaque OPC du jeu de données guyanais. Ces valeurs ont ensuite été exprimées sous la forme d'EQR, en utilisant les valeurs de référence établies pour la métropole :

$$MG-P_{EQR} = (MG-P - 12,990) / (15,527 - 12,990)$$

$$MG-A_{EQR} = (MG-A - 12,684) / (14,971 - 12,684)$$

$$MS-N_{EQR} = (MS-N - 9,517) / (12,288 - 9,517)$$

Calcul de l'IPHYGE

La valeur de l'IPHYGE est la moyenne pondérée des valeurs EQR de ses quatre métriques constitutives :

$$IPHYGE = (0,5 \times MBP_{EQR} + MG-P_{EQR} + MG-A_{EQR} + MS-N_{EQR}) / 3,5$$

Après ce dernier calcul, les valeurs supérieures à 1 sont ramenées à 1.

III.1.5 Les métriques calculées à partir de l'application de la méthode TITAN

La méthode TITAN, pour Threshold Indicator Taxa ANalysis, permet d'identifier les valeurs optimales d'un gradient environnemental en calculant des scores de spécificité pour chaque taxon. A l'instar des métriques et indices trophiques basés sur la formule de Zelinka et Marvan (1961), ces scores de spécificités reflètent les préférences écologiques des taxons pour un gradient donné. L'application de la méthode TITAN permet ainsi d'identifier des taxons « d'alerte » présentant une réponse significative : (i) soit une affinité au gradient (les taxons « z+ », que l'on pourrait par exemple qualifier d'eutrophes, dans le cas d'un gradient d'eutrophisation), (ii) soit un déclin face à l'augmentation du gradient (les taxons « z- », oligotrophes, dans le cas d'un gradient d'eutrophisation). Une étape de bootstrap (analyse sur des sous-jeux de données, $n \geq 500$) permet d'estimer la pureté et la fiabilité des z-scores calculés pour chaque taxon, et donc d'identifier les taxons d'alerte les plus pertinents et robustes.

La méthode TITAN a été privilégiée pour le développement de la méthode diatomique pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau guyanais, l'Indice Diatomique pour la Guyane Française (Carayon et al. 2019). Pour une description exhaustive du fonctionnement de la méthode TITAN, nous renvoyons le lecteur au rapport de Carayon et al. (2019).

La méthode TITAN permet de générer des métriques pour différents gradients

d'intérêt, qui peuvent par la suite être combinées dans un unique indice multimétrique (e.g. Carayon et al. 2019). Dans le cas présent, la méthode TITAN a été appliquée à trois gradients d'intérêt : les concentrations en phosphore total, en azote Kjeldahl et en matières en suspension. Cinq métriques différentes ont été calculées à partir des listes des taxons d'alerte obtenues pour chaque paramètre d'intérêt :

- la richesse relative des taxons d'alerte z^+ ($S_{rel(z^+)}$), par rapport à la richesse taxonomique totale (S), calculée avec la formule suivante : $S_{rel(z^+)} = S_{z^+} / S$, avec S_{z^+} la richesse taxonomique des taxons d'alerte z^+ ;
- la richesse relative des taxons d'alerte z^+ , par rapport à la richesse taxonomique totale des taxons d'alerte z^+ et z^- ;
- la richesse totale des taxons d'alerte z^+ ;
- le biovolume relatif des taxons d'alerte z^+ , par rapport au biovolume total ;
- le biovolume relatif des taxons d'alerte z^+ , par rapport au biovolume total des taxons d'alerte z^+ et z^- .

Par défaut, la méthode TITAN ne sélectionne comme taxons d'alerte que les taxons présentant une pureté et une fiabilité supérieures à 0,95 (ces valeurs sont comprises entre 0 et 1). Cependant ces critères, par défaut, peuvent être trop stricts et mener à une liste de taxons d'alerte très restreinte (uniquement quelques taxons), ce qui peut limiter les performances de la méthode TITAN. Nous avons fait le choix d'être légèrement moins stricts sur ces critères, afin d'obtenir une liste de taxons d'alerte comprenant au moins 10 genres différents. Pour les matières en suspension, les critères ont été encore légèrement diminués afin d'inclure des taxons z^- à la liste des taxons d'alerte. Ainsi, les valeurs de pureté et de fiabilité minimales ($Min_{(p \text{ et } f)}$) étaient les suivantes pour les trois paramètres d'intérêt : $Min_{(p \text{ et } f)} = 0,85$ pour l'azote Kjeldahl, $Min_{(p \text{ et } f)} = 0,95$ pour le phosphore total et $Min_{(p \text{ et } f)} = 0,85$ pour les MES.

III.2 Analyses statistiques et calculs des performances des métriques

Les performances des métriques ont été évaluées grâce à deux approches :

(i) la 1^{ère} approche a consisté à réaliser des **régressions linéaires** entre les valeurs de ces métriques avec les concentrations en **phosphore total**, ou éventuellement avec les mesures d'autres paramètres d'intérêt, en fonction des caractéristiques inhérentes à certaines métriques. Le phosphore total a été sélectionné comme principal paramètre d'intérêt pour la réalisation de ces régressions linéaires, car la distribution de ses valeurs est suffisamment étendue, c'est-à-dire qu'il existe bien un gradient de pression (cf. Figures 3 et 4), et car il s'agit du paramètre classiquement étudié pour calibrer les méthodes de bio-évaluation basées sur le phytoplancton (Mischke et al. 2016) ;

(ii) la 2^{nde} approche a consisté à calculer leur efficacité de discrimination (DE). Pour une métrique donnée, si sa valeur est croissante le long d'un gradient de pression, la valeur de la DE correspond à la proportion des valeurs en situations impactées par des pressions d'origine anthropique (IRR) supérieures à la valeur du 3^{ème} quartile

observé dans les situations peu ou pas impactées (LIRR) (Figure 12). A l'inverse, si sa valeur est décroissante le long d'un gradient de pression, la valeur de la DE correspond à la proportion des valeurs en situations impactées par des pressions d'origine anthropique (IRR) inférieures à la valeur du 1^{er} quartile observé dans les situations peu ou pas impactées (LIRR) (Figure 12).

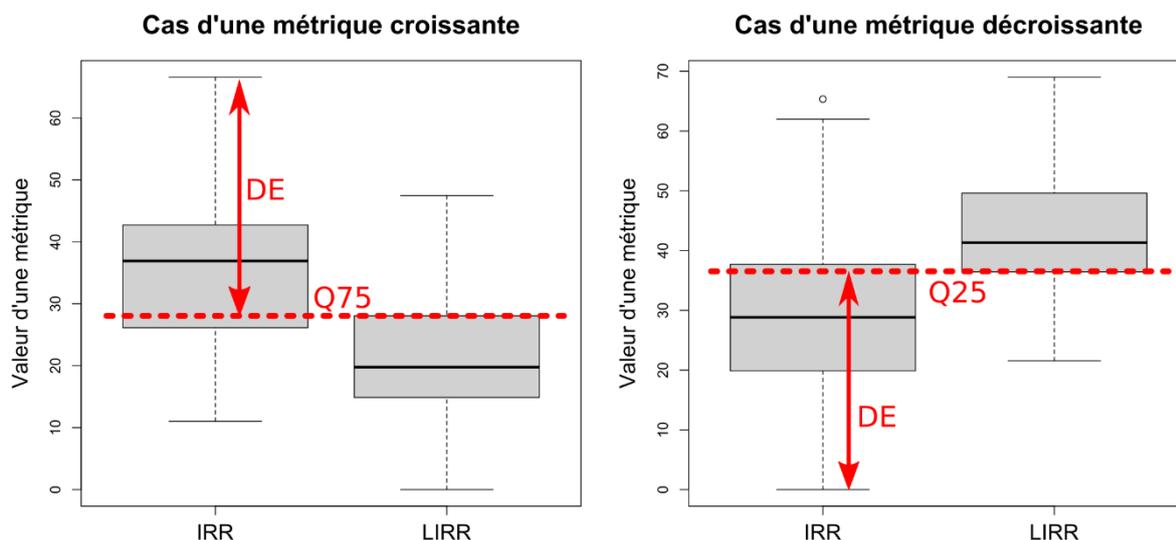


Figure 12 Exemples de calcul de l'efficacité de discrimination (DE) d'une métrique quelconque en fonction de la distribution de ses valeurs en situations impactées (IRR) ou en situations peu impactées (« de référence », LIRR). Les valeurs présentées sur cette figure ont été générées aléatoirement. Q25 = 1^{er} quartile, Q75 = 3^{ème} quartile. Figure reprise de Meyer et al. (2023).

L'intégralité des analyses statistiques a été réalisée à l'aide du logiciel R (version 4.2.1 ; R Core Team 2022). Les bibliothèques suivantes ont été utilisées : pour le calcul de certaines métriques structurales, *vegan* (Oksanen et al. 2020), pour les régressions linéaires, *lmerTest* (Zeileis & Hothorn 2002), pour les tests de comparaisons multiples, *PMCMRplus* (Pohlert 2022) et *multcompView* (Graves et al. 2019), pour l'application de la méthode TITAN, *TITAN2* (Baker et al. 2023), pour la réalisation de certaines figures, *ggplot2* (Wickham 2016), pour les analyses multivariées, *ade4* (Dray & Dufour 2007).

III.3 Analyse des performances des métriques

III.3.1 Performances des métriques de biomasse

Les résultats illustrés sur la Figure 13 mettent en évidence que les valeurs des différents proxys de la biomasse phytoplanctonique disponibles pour les GCE guyanais ne permettent pas de retrouver le gradient des concentrations en phosphore total, quel que soit le proxy. Ces résultats suggèrent que les concentrations en phosphore total ne semblent pas un facteur déterminant de la biomasse

phytoplanctonique, au contraire de ce qui peut être observé en métropole (Meyer et al. 2023). Cette absence de relation entre ces deux paramètres pourrait s'expliquer par l'existence d'autres facteurs limitants, par exemple la turbidité ou la température de l'eau, qui seraient mieux à même d'expliquer les valeurs de biomasse phytoplanctonique observées. Néanmoins, l'influence de ces facteurs sur la biomasse phytoplanctonique ne semble pas significative pour le jeu de données actuel (cf. la matrice de corrélation disponible dans les Annexes, Figure S1). Cette absence de relation entre proxys et phosphore total met aussi en évidence qu'il faudra

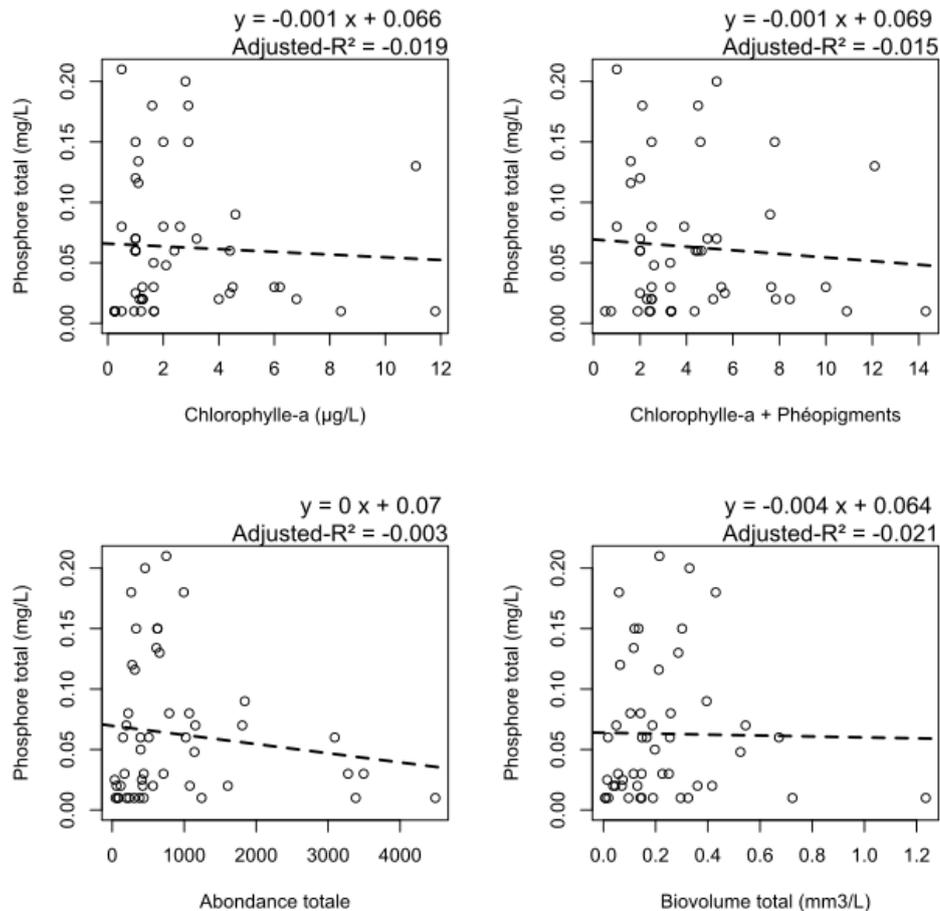


Figure 13 Résultats des régressions linéaires entre différents proxys de la biomasse phytoplanctonique avec les concentrations en phosphore total. $N = 49$ OPC.

éventuellement identifier un autre proxy et/ou les facteurs limitants afin de concevoir une métrique de biomasse robuste et performante.

III.3.2 Performances des métriques structurelles

Le Tableau 5 et la Figure 14 présentent les performances des différentes métriques non basées sur la biomasse phytoplanctonique qui retranscrivent le gradient de phosphore total observé pour les GCE guyanais. Comme déjà abordé dans la section précédente, les métriques de biomasse ne corrélaient pas avec les concentrations en phosphore total. Les performances pour les métriques de richesse

et diversité ne donnent pas de meilleurs résultats, mais elles présentent quand même des valeurs de DE intéressantes, supérieures à 0,40 pour trois d'entre elles.

Les métriques calculées au niveau de chaque classe floristique présentent des performances intéressantes, avec en particulier les richesses relatives des Chlorophyceae et des Cryptophyceae qui sont bien corrélées avec les concentrations en phosphore total, avec respectivement des valeurs de R^2 ajustés égales à 0,2435 et 0,2327. La richesse relative des Chlorophyceae est corrélée positivement avec les concentrations en phosphore total, alors que la richesse relative des Cryptophyceae est corrélée négativement. Cette observation est cohérente avec les résultats de l'AFC (Figures 9 et 10), où nous avons pu observer que les Chlorophytes semblaient plus abondantes pour les situations impactées (IRR). Ces deux métriques présentent des valeurs de DE correctes (supérieures à 0,50), toutes les deux égales à 0,5294. Nous pouvons aussi remarquer les bonnes performances de la métrique de richesse totale des Trebouxiophyceae : certes, les valeurs de cette métrique sont moins bien corrélées avec les concentrations en phosphore total que les deux métriques précédentes, mais elle présente une bonne efficacité de discrimination (DE = 0,5882).

III.3.3 Performances des métriques fonctionnelles

Les métriques fonctionnelles présentent les meilleures performances parmi les performances présentées dans le Tableau 5 et illustrées dans la Figure 14. Les meilleures métriques fonctionnelles sont des indices de recouvrement de niche. Les valeurs de ces derniers varient entre 0 et 1, et tendent vers 1 lorsque tous les taxons d'une OPC présentent le même « profil fonctionnel » pour un trait donné, ou, dit autrement, qu'ils présentent les mêmes traits. L'indice de recouvrement de niche est donc par extension un indicateur de la diversité fonctionnelle pour un trait donné.

L'indice de recouvrement de niche pour le trait « Mobilité » présente un R^2 ajusté égal à 0,4162 et un rho égal à 0,6458. Il s'agit des meilleures performances, toutes métriques confondues, présentées dans le Tableau 5. La valeur de sa DE est correcte, égale à 0,5588, mais d'autres métriques présentent des valeurs de DE plus élevées. La valeur de cette métrique augmente en parallèle des concentrations en phosphore total. Une étude des valeurs des fréquences relatives d'utilisation des modalités observées pour ce trait suggère que le recouvrement de niche augmente car les communautés phytoplanctoniques semblent privilégier des taxons non-mobiles (i.e. ne présentant pas d'adaptations particulières permettant une mobilité active), peut-être liée à l'augmentation de l'importance relative de taxons avec un biovolume plus important (cf. le paragraphe suivant), souvent peu mobiles.

Le deuxième indice de recouvrement de niche, pour le trait « Biovolume cellulaire », est moins performant que le premier indice, mais ses performances restent parmi les meilleures observées, avec le R^2 ajusté et le rho de Spearman respectivement égaux à 0,3091 et -0,5612. Une étude des valeurs des fréquences relatives d'utilisation des modalités observées pour ce trait suggère que le recouvrement de niche diminue pour ce trait en réponse à une augmentation des

concentrations en phosphore total via une augmentation de l'importance des cellules avec un biovolume important (compris entre 200 et 800 $\mu\text{m}^3/\text{mL}$) au sein des communautés phytoplanctoniques. Ce résultat est cohérent avec la bibliographie, qui montre que l'eutrophisation des milieux favorise les taxons avec des biovolumes cellulaires importants (e.g. Abonyi et al. 2019). La valeur de DE pour cette métrique reste malheureusement un peu limitée, car elle est « seulement » égale à 0,4412.

Le troisième indice de recouvrement de niche, pour le trait des « Préférences trophiques », présente des performances similaires au deuxième indice, avec un R^2 ajusté et un rho de Spearman respectivement égaux à 0,2605 et 0,5741. La valeur de DE est par contre plus faible, car égale à 0,2941. Une étude des valeurs des fréquences relatives d'utilisation des modalités observées pour ce trait suggère que le recouvrement de niche augmente pour ce trait en réponse à une augmentation des concentrations en phosphore total via une augmentation de la dominance des taxons mésotrophes et eutrophes au sein des communautés phytoplanctoniques.

Parmi les autres métriques fonctionnelles nous pouvons aussi mettre en évidence deux métriques de fréquence relative d'utilisation de modalité de trait, qui présentent des valeurs élevées de DE ($> 0,70$), avec la modalité « Mésotrophie » pour le trait de « Préférences trophiques » (DE = 0,7647) et la modalité « Faible luminosité » pour le trait des « Tolérances » (DE = 0,7059). Une augmentation de l'importance relative de la modalité « Mésotrophie » est observée en réponse à une augmentation des concentrations en phosphore total (cf. paragraphe précédent). La modalité de tolérance à des « Faibles luminosité » présente aussi une diminution de sa fréquence relative dans les communautés phytoplanctoniques en réponse à une augmentation des concentrations en phosphore total. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les sites impactés par une eutrophisation présentent une disponibilité de la lumière plus importante, car ils sont localisés plus en aval et sont donc potentiellement plus larges et moins fermés par la canopée.

III.3.4 Performances de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives

Les performances de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives sont relativement correctes (Tableau 5, Figures 14 et 15), surtout que cet indice et ses métriques ont été conçus à partir des données de France métropolitaine. De plus les réponses des métriques sont cohérentes, c'est-à-dire qu'elles présentent bien une corrélation négative avec les concentrations en phosphore total.

Parmi les différentes métriques constitutives de l'IPHYGE, la meilleure métrique est la MG-P, dont les valeurs sont correctement corrélées avec les concentrations en phosphore total. Le R^2 ajusté est certes un peu faible, car égal à 0,2087, mais les valeurs de la MG-P présentent une corrélation non-linéaire significative et correcte, avec un rho de Spearman égal à -0,6069. Sa valeur de DE est aussi correcte, car égale à 0,5588. Cette métrique a été conçue pour mettre en évidence des gradients de phosphore total, ce qui explique pourquoi elle apparaît ici comme la meilleure des métriques constitutives.

La métrique MG-A présente aussi des performances moyennes vis-à-vis des concentrations en phosphore total, avec un R^2 ajusté et un rho de Spearman respectivement égaux à 0,1452 et -0,4707. Ses performances sont moins bonnes que celles observées pour la MG-P, mais cette sous-performance est cohérente avec le fait que cette métrique a été conçue à l'origine pour mettre en évidence des gradients d'azote Kjeldahl. Néanmoins, cette métrique présente une valeur de DE légèrement supérieure à celle de la MG-P, avec une DE égale à 0,5882.

Les deux autres métriques constitutives de l'IPHYGE ne présentent pas de bonnes performances vis-à-vis des concentrations en phosphore total. La métrique MS-N a été conçue pour mettre en évidence des gradients de nitrates en France métropolitaine, donc sa sous-performance pour le phosphore total pouvait être attendue. La métrique MBP a été créée à partir de la relation existant en France métropolitaine entre les concentrations en chlorophylle-a et celles du phosphore total observée. Comme déjà montré pour les métriques de biomasse, les concentrations en chlorophylle-a mesurées dans les GCE guyanais sont très peu corrélées avec les concentrations en phosphore total, entre autres parce que ces concentrations en chlorophylle-a sont très faibles en général en Guyane.

Les valeurs de l'IPHYGE sont correctement corrélées avec les concentrations en phosphore total, avec un R^2 ajusté égal à 0,1568 et un rho de Spearman égal à -0,5171, et ce malgré le fait que les valeurs de l'IPHYGE soient obtenues via une moyenne pondérée des valeurs de ses quatre métriques constitutives. La corrélation est d'ailleurs à une valeur proche de celles observées pour la MG-P. Seule la valeur de DE est un peu plus basse, car égale à 0,4706 contre 0,5588 pour la MG-P.

Tableau 5 Performances des métriques vis-à-vis des concentrations en phosphore total, avec le R² ajusté obtenu via des régressions linéaires et le rho des tests de corrélation de Spearman. Les valeurs en gras indiquent les résultats significatifs. Pour les métriques par classe floristique, seules les performances de la meilleure métrique pour les 7 classes sont présentées. Pour les métriques fonctionnelles seules les performances des 10 meilleures métriques sont présentées. DE = efficacité de discrimination (les cases colorées indiquent les valeurs supérieures ou égales à 0,50 ; ce seuil est arbitraire).

	Type de métrique	R ² ajusté	rho de Spearman	DE
Métriques de biomasse				
Biovolume total	Métrique de biomasse	-0,0210	0,1439	0,0588
Abondance totale	Métrique de biomasse	-0,0028	0,1698	0,1765
Métriques de richesse et diversité				
Richesse taxonomique totale	Richesse totale	-0,0073	0,0924	0,5294
Indice de Shannon	Indice de diversité	-0,0108	0,0808	0,4412
Equitabilité de Pielou	Indice de diversité	-0,0170	0,0588	0,3529
Indice de Simpson	Indice de diversité	-0,0194	-0,0091	0,4118
Métriques par classe floristique				
CHLOROPHYCEAE	Richesse relative	0,2435	0,6123	0,5294
CRYPTOPHYCEAE	Richesse relative	0,2327	-0,4090	0,5294
CHRYSOPHYCEAE	Richesse relative	0,1134	-0,3426	0,3235
PYRAMIMONADOPHYCEAE	Richesse totale	0,0954	0,3294	0,0588
DINOPHYCEAE	Richesse relative	0,0590	-0,3489	0,0000
RAPHIDOPHYCEAE	Richesse relative	0,0574	-0,3446	0,0882
TREBOUXIOPHYCEAE	Richesse totale	0,0759	0,2769	0,5882
Métriques fonctionnelles				
Mobilité	Indice de recouvrement	0,4162	0,6458	0,5588
Biovolume cellulaire	Indice de recouvrement	0,3091	-0,5612	0,4412
Préférences trophiques	Indice de recouvrement	0,2605	0,5741	0,2941
Formes de vie	Diversité de Rao	0,2733	0,5477	0,6471
Pigments secondaires	Indice de recouvrement	0,3028	0,4315	0,2647
Formes de vie (cellule)	Fréquence relative d'utilisation	0,2023	-0,4645	0,5294
Tolérances (absence)	Fréquence relative d'utilisation	0,1982	0,4452	0,3824
Préférences trophiques (mésotrophie)	Fréquence relative d'utilisation	0,1552	-0,4651	0,7647
Biovolume individuel	Indice de recouvrement	0,2136	-0,4101	0,2941
Tolérances (faible luminosité)	Fréquence relative d'utilisation	0,1555	-0,4568	0,7059
Métriques de l'IPHYGE				
MG-P	Métrique trophique	0,2087	-0,6069	0,5588
MG-A	Métrique trophique	0,1452	-0,4707	0,5882
MS-N	Métrique trophique	0,0141	-0,3634	0,1471
MBP	Métrique de biomasse	-0,0162	0,1197	0,2941
IPHYGE	Indice DCE	0,1568	-0,5171	0,4706

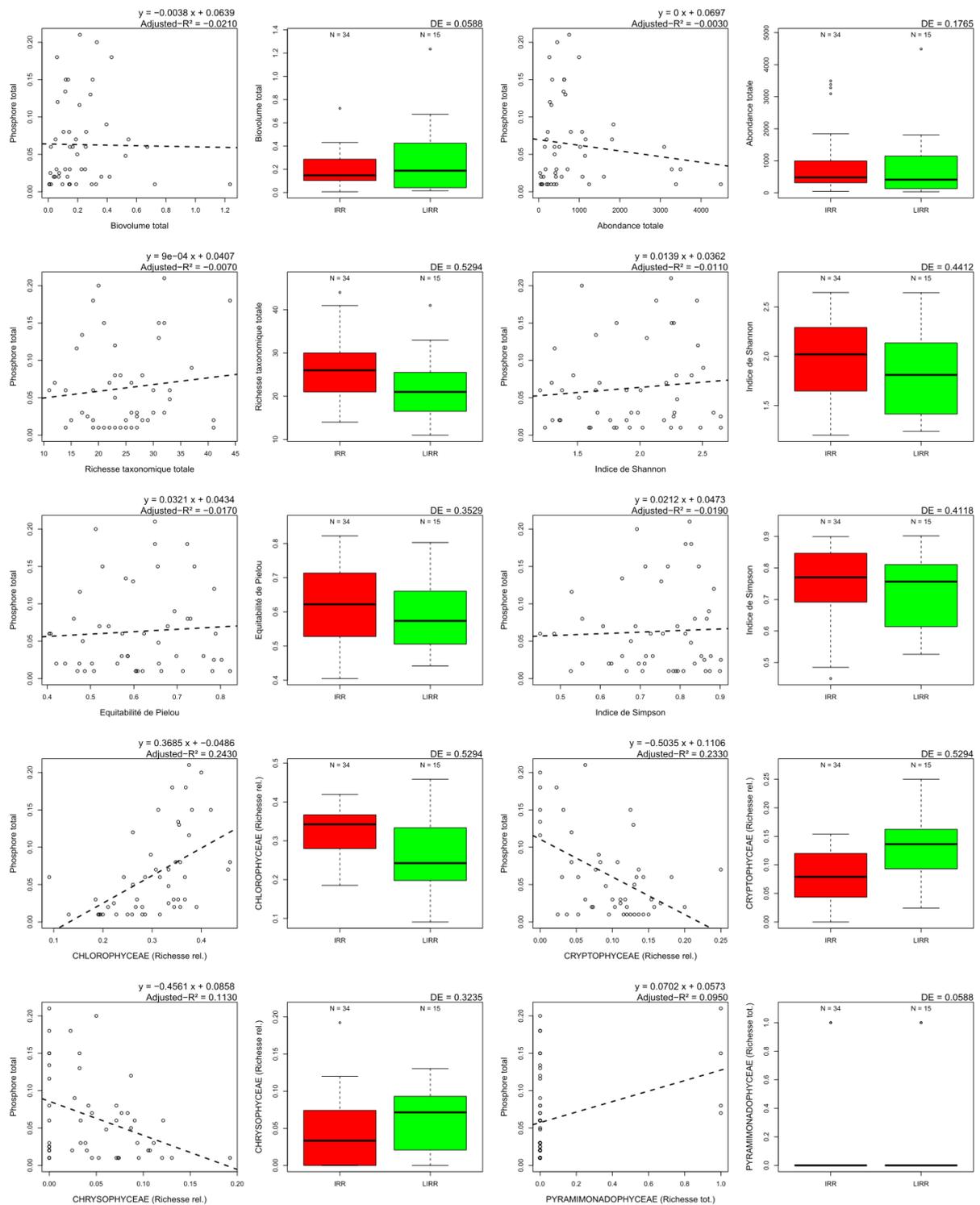


Figure 14 Performances des métriques listées dans le Tableau 5 sous la forme de régressions linéaires (droite en pointillés) avec les concentrations en phosphore total et sous la forme de boîtes à moustache des distributions des valeurs de ces métriques dans les IRR (en rouge) et dans les LIRR (en vert). Les valeurs de R ajustés et les valeurs de DE sont indiquées au-dessus de chaque graphique. N = 49.

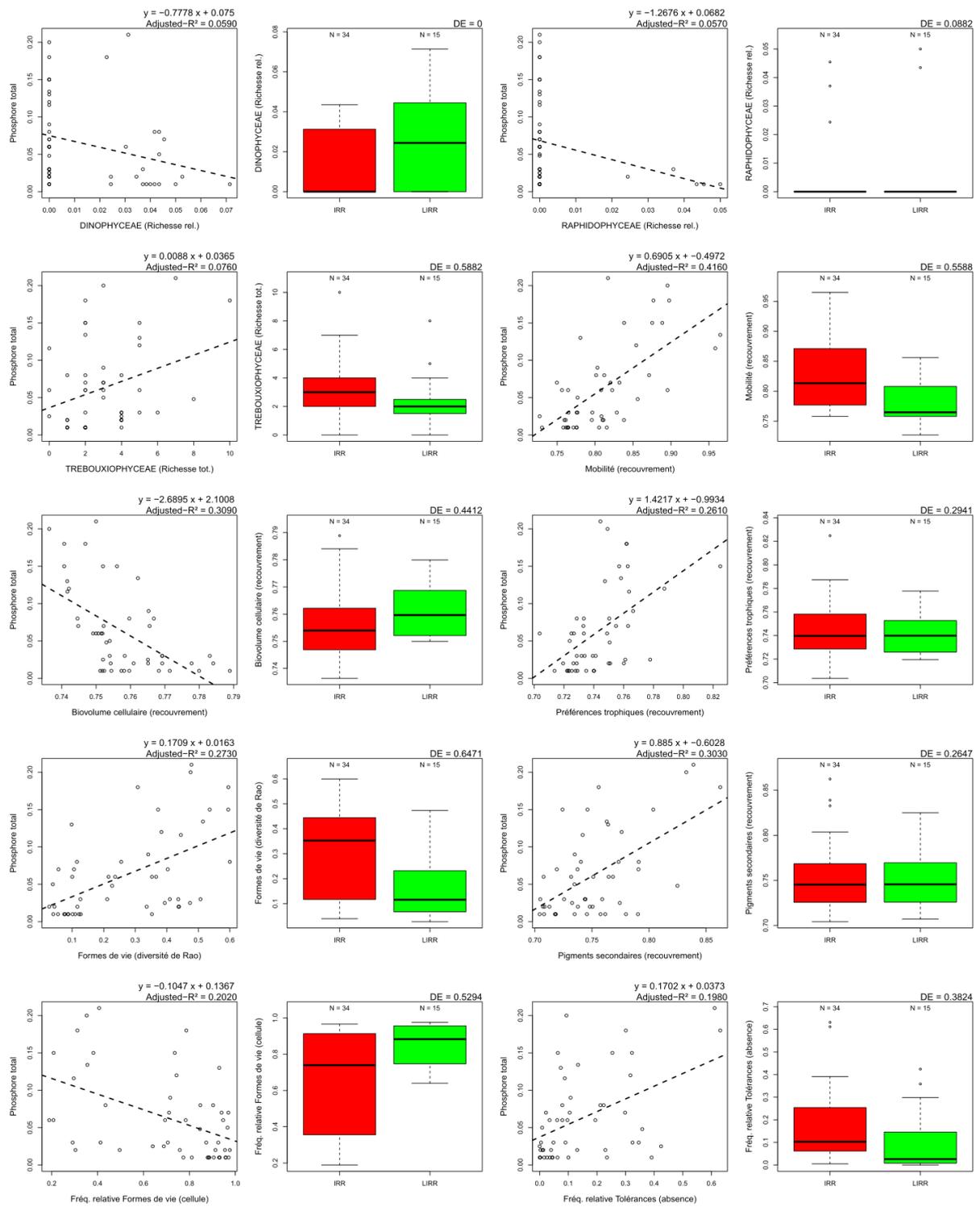


Figure 14 (suite).

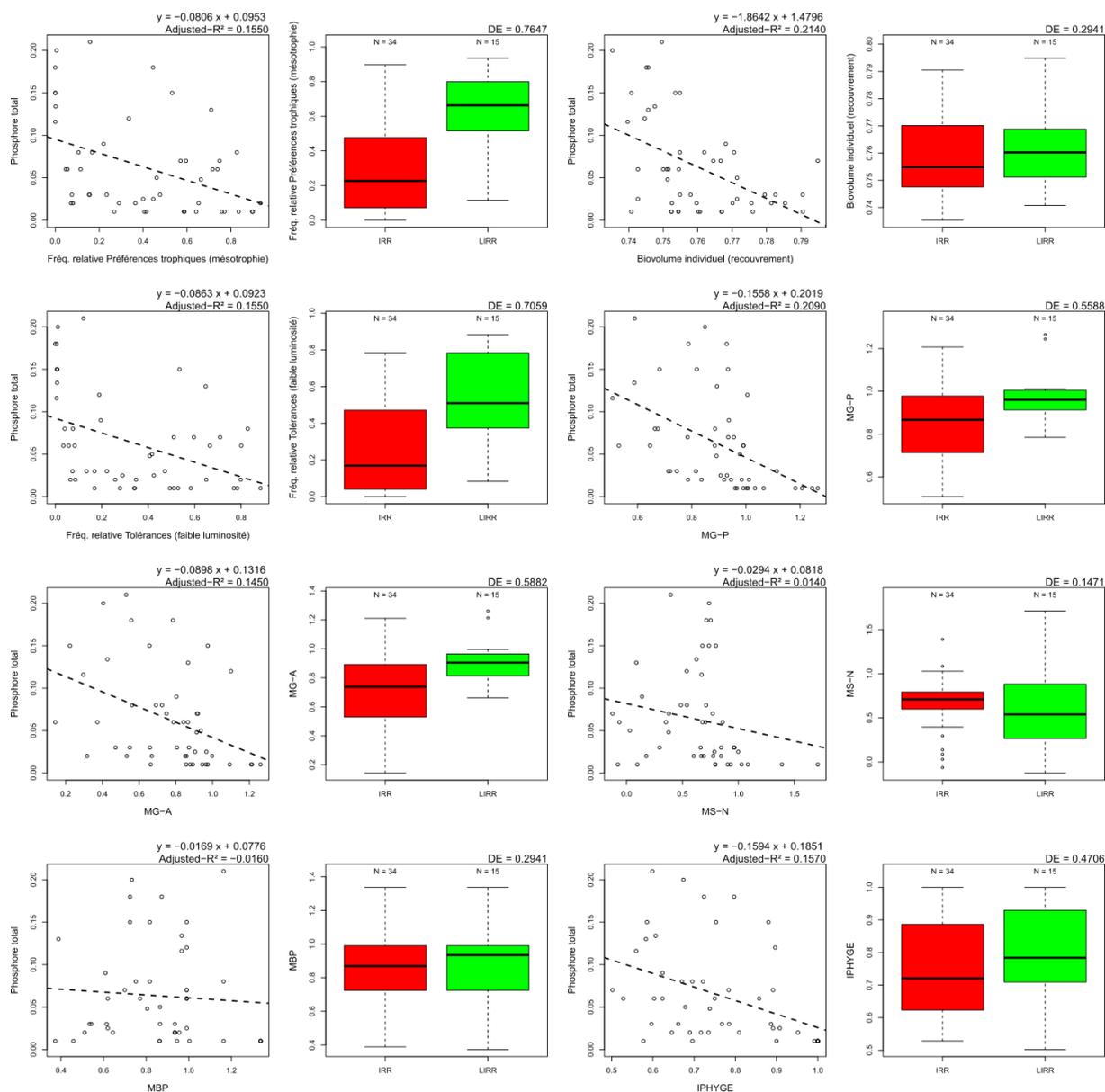


Figure 14 (fin).

Les réponses de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives aux gradients de phosphore total, d'azote Kjeldahl et de nitrates pour les GCE guyanais ont été comparées avec celles obtenues pour les GCE de France métropolitaine lors du développement de la méthode (Figure 15 ; Meyer et al. 2023). L'objectif est ici de vérifier si les réponses des métriques et de l'indice en Guyane sont cohérentes avec celles observées lors du développement. Par extension, cela peut permettre de juger si l'application de l'IPHYGE en Guyane pourrait s'avérer pertinente.

Les résultats montrent que l'IPHYGE et ses métriques présentent des réponses cohérentes, pertinentes et comparables avec celles observées en métropole pour le gradient de phosphore total. Néanmoins les performances des différentes métriques et de l'IPHYGE sont globalement plus faibles que celles observées en métropole. Elles restent cependant relativement correctes en considérant le fait que cette méthode a été développée pour des GCE très différents.

Seule la métrique de biomasse, la MBP, présente une performance nulle pour les concentrations en phosphore total, avec un R^2 négatif après ajustement. Cette observation indique que le développement des communautés phytoplanctoniques (i.e. la biomasse, étudiée via le biovolume total et/ou les concentrations en chlorophylle-a) est différent dans les GCE guyanais, car expliqué et/ou limité par d'autres facteurs. Ceci étant, la structure de ces communautés guyanaises répond d'une manière assez similaire à ce qui est observé en métropole pour un gradient de phosphore total, puisque la MG-P montre une réponse cohérente.

L'IPHYGE et ses métriques ne montrent pas de réponses pertinentes pour les gradients d'azote Kjeldahl et de nitrates (Figure 15). Pour l'azote Kjeldahl, les régressions linéaires indiquent même des réponses croissantes des valeurs de l'IPHYGE et de ses métriques, alors qu'elles devraient être décroissantes. Les réponses sont bien décroissantes pour les nitrates, mais les nuages de points montrent un décalage vers des valeurs plus faibles des métriques MG-A, MS-N et de l'indice que ce qui est observé en métropole pour une même gamme de concentrations en nitrates.

Les distributions des valeurs de ces trois paramètres chimiques en fonction des classes d'état biologique attribuées à partir de l'IPHYGE (via l'utilisation des limites définies pour la métropole) confirment l'inadaptation de l'IPHYGE et de ses métriques pour mettre en évidence des gradients azotés, azote Kjeldahl ou nitrates (Figure 16). Néanmoins, les résultats sont relativement corrects pour le phosphore total, avec une progression cohérente des concentrations en phosphore total en passant de la classe « Très Bon (High) » à la classe « Médiocre (Poor) ». Cette progression est cependant moins marquée que celle observée en métropole, avec des différences non-significatives entre deux classes consécutives (par exemple, entre « Très Bon (High) » et « Bon (Good) »), mais qui le deviennent à partir de deux classes d'écart (par exemple, entre « Très Bon (High) » et « Moyen (Moderate) » ou entre « Très Bon (High) » et « Médiocre (Poor) »).

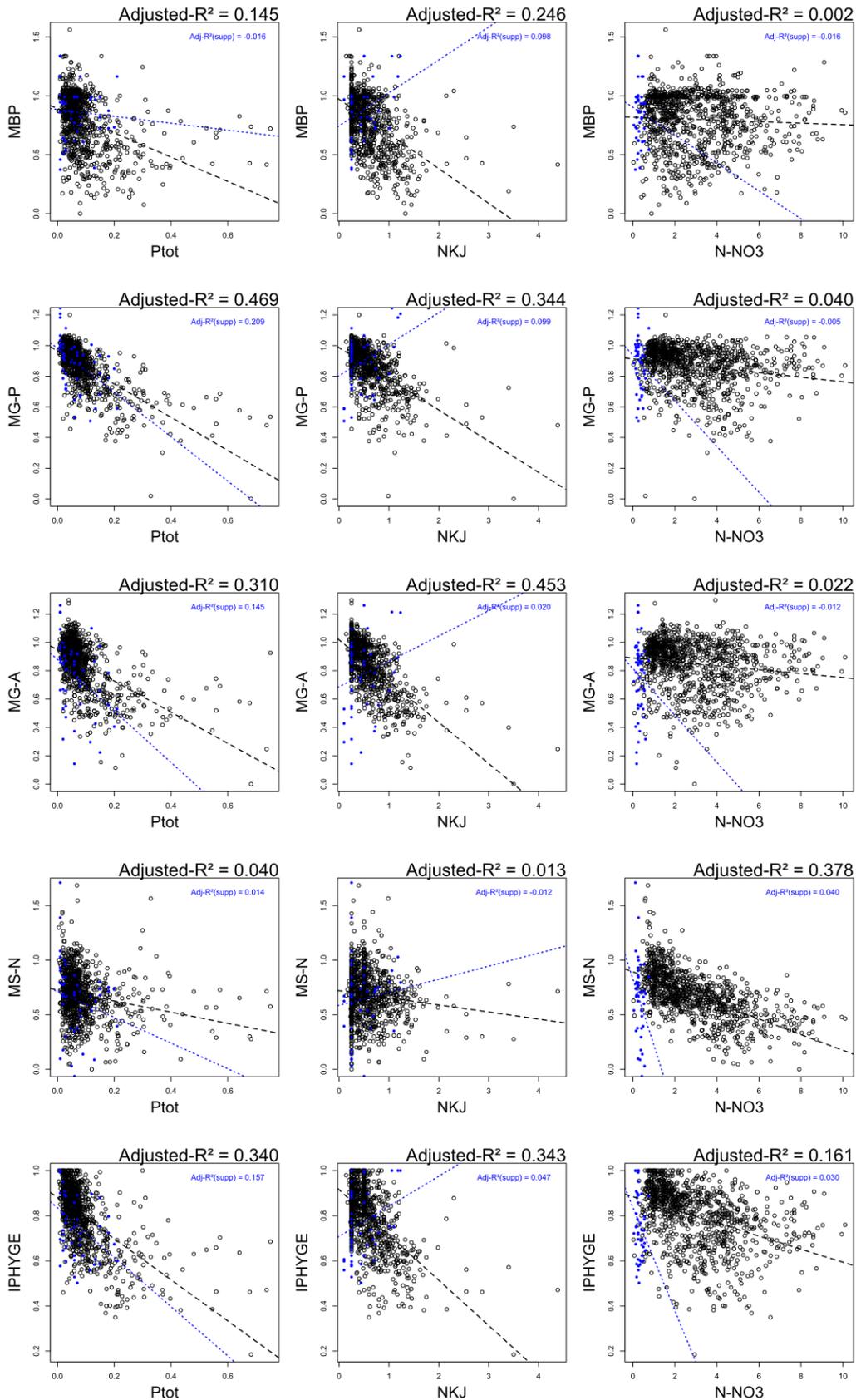


Figure 15 Régressions linéaires entre les concentrations en phosphore total, en azote Kjeldahl et en nitrates avec les valeurs exprimées en EQR de l'IPHYGE et de ses métriques constitutives pour deux jeux de données : celui de développement de l'IPHYGE (N = 963 OPC de France métropolitaine ; en noir) et celui guyanais (N = 49 OPC ; en bleu). Les droites de régressions sont en pointillées.

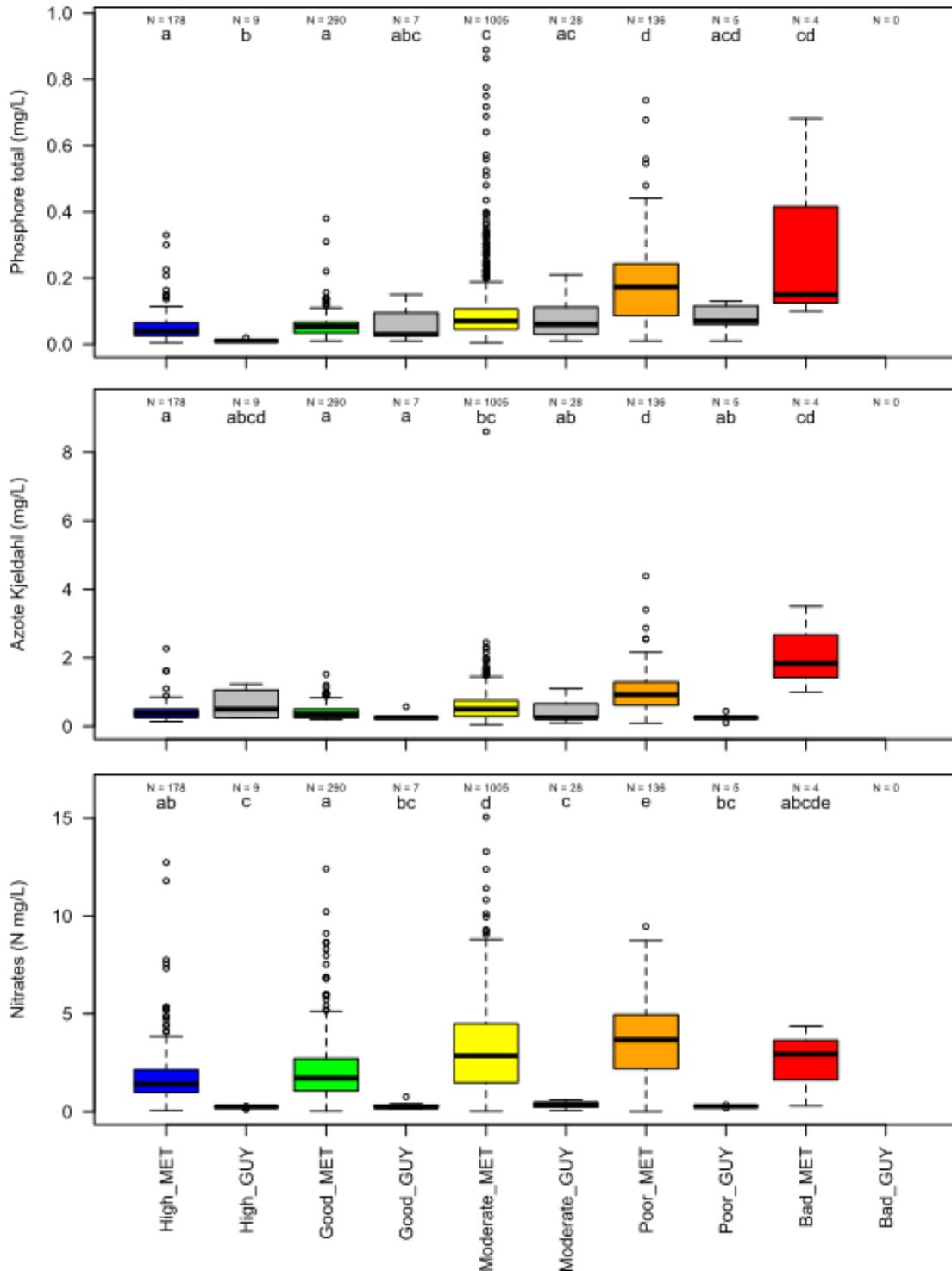


Figure 16 Boîtes à moustaches de la distribution des valeurs des concentrations en phosphore total, en azote Kjeldahl et en nitrates en fonction des classes d'état biologique attribuées à partir des valeurs de l'IPHYGE. Les boîtes colorées correspondent aux données métropolitaines (MET) et les boîtes grises correspondent aux données guyanaises (GUY). Le lettrage des boîtes renseigne sur les groupes identifiés suite à des tests post hoc de comparaisons multiples effectués à la suite d'un test significatif de Kruskal-Wallis.

III.3.5 Performances des métriques obtenues avec la méthode TITAN

Avec le jeu de données actuel, les résultats de l'application de la méthode TITAN sont encourageants, puisque les meilleures métriques pour chaque paramètre chimique d'intérêt présentent des performances meilleures que celles obtenues avec les métriques précédemment explorées (Tableaux 5 et 6).

La meilleure métrique pour l'azote Kjeldahl (i.e. la richesse relative des taxons d'alerte z+, par rapport à la richesse des taxons z+ et z-) présente un R² ajusté pour ce paramètre égal à 0,4356. Néanmoins, sa valeur de DE reste faible, puisqu'elle est égale à 0,2647 (Tableau 6 et Figure 17).

Pour le phosphore total, la meilleure métrique (i.e. le biovolume relatif des taxons d'alerte z+, par rapport au biovolume total des taxons z+ et z-) présente un R² ajusté égal à 0,5485 et une valeur élevée de DE, égale à 0,8235 (Tableau 6 et Figure 17). Les autres métriques TITAN obtenues avec le phosphore total présentent des R² ajustés très corrects, avec des valeurs comprises entre 0,4235 et 0,5631. La métrique avec le meilleur R² ajusté pour le phosphore total (i.e. la richesse relative des taxons z+) n'a cependant pas une bonne valeur de DE (DE = 0,4412).

En comparaison avec les performances ci-dessus, les métriques TITAN développées à partir du gradient de MES ne présentent pas de bonnes performances, surtout pour les valeurs de R² ajustés. La meilleure métrique pour les MES (i.e. la richesse relative des taxons d'alerte z+, par rapport à la richesse totale des taxons z+ et z-) présente ainsi un R² ajusté de 0,1535. Cependant, les métriques TITAN pour les MES présentent de bonnes valeurs de DE, comprises entre 0,4412 et 0,7647 (Tableau 6 et Figure 17). Ces résultats de DE soulignent que les métriques bien corrélées avec les MES sont d'intérêt pour bien discriminer entre situations impactées et non-impactées.

Tableau 6 Performances des métriques calculées à partir des listes de taxons d'alerte (genres) obtenues via l'application de la méthode TITAN pour trois paramètres d'intérêt. Les valeurs de R^2 ajustés en gras indiquent les résultats de régression linéaire significatifs. $z+/z\pm$ indique les métriques de richesses/biovolumes relatifs des taxons $z+$ par rapport aux mêmes valeurs pour l'ensemble des taxons d'alerte ($z+$ et $z-$). Les cases avec un fond vert illustrent les valeurs de DE supérieures à 0,50.

Gradient ciblé	Métrique	R^2 ajustés			
		NKJ	Phosphore total	MES	DE
Azote Kjeldahl	Richesse totale ($z+$)	0,1686	-0,0208	-0,0079	0,0588
Azote Kjeldahl	Richesse relative ($z+$)	0,2183	-0,0191	0,0004	0,2941
Azote Kjeldahl	Richesse relative ($z+/z\pm$)	0,4356	0,0564	0,0088	0,2647
Azote Kjeldahl	Biovolume relatif ($z+$)	0,1682	0,0352	-0,0135	0,0588
Azote Kjeldahl	Biovolume relatif ($z+/z\pm$)	0,3748	0,1127	-0,0132	0,3529
Phosphore total	Richesse totale ($z+$)	-0,0211	0,4978	0,0228	0,5000
Phosphore total	Richesse relative ($z+$)	-0,0204	0,5631	0,0373	0,4412
Phosphore total	Richesse relative ($z+/z\pm$)	-0,0205	0,4235	0,0319	0,5588
Phosphore total	Biovolume relatif ($z+$)	-0,0207	0,4303	-0,0212	0,5882
Phosphore total	Biovolume relatif ($z+/z\pm$)	-0,0133	0,5485	0,0121	0,8235
MES	Richesse totale ($z+$)	-0,0115	0,0753	0,1052	0,6765
MES	Richesse relative ($z+$)	-0,0206	0,0730	0,1385	0,7353
MES	Richesse relative ($z+/z\pm$)	-0,0211	0,3560	0,1535	0,7647
MES	Biovolume relatif ($z+$)	-0,0213	-0,0101	0,0008	0,4412
MES	Biovolume relatif ($z+/z\pm$)	0,0301	0,3682	0,0238	0,7353

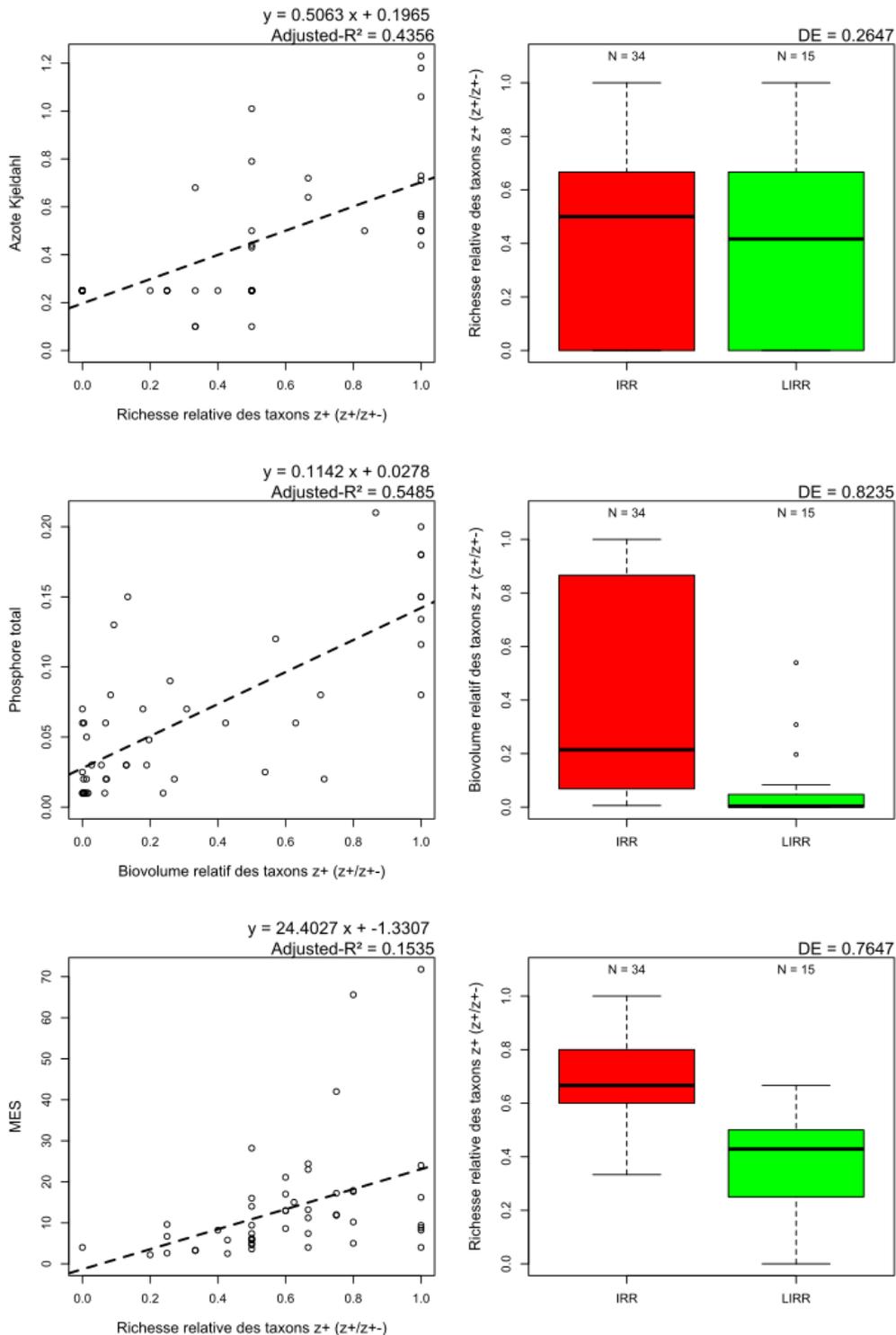


Figure 17 Performances des meilleures métriques développées avec la méthode TITAN pour trois gradients d'intérêt : l'azote Kjeldahl (les deux figures du haut), le phosphore total (les deux figures du milieu) et les matières en suspension (MES ; les deux figures du bas). Les performances sont données sous la forme de régressions linéaires (droite en pointillés) des valeurs des paramètres d'intérêt en fonction des valeurs des métriques et sous la forme de boîtes à moustache des distributions des valeurs de ces métriques dans les IRR (en rouge) et dans les LIRR (en vert). Les valeurs de R ajustés et les valeurs de DE sont indiquées au-dessus de chaque graphique. N = 49.

IV. Préconisations et perspectives

Les résultats présentés dans la partie précédente mettent bien en évidence que les données déjà acquises sur les GCE guyanais pourraient, en théorie, permettre le développement d'une méthode phytoplanctonique spécifique à ces cours d'eau. En effet, certaines des métriques calculées sur ces premières données sont capables de bien restituer différents gradients de paramètres physico-chimiques, signes de possibles impacts anthropiques, qu'il s'agisse des paramètres azotés, phosphorés ou des MES. Ces résultats mettent aussi en exergue la nécessité de développer une méthode spécifique à la Guyane : par exemple, la biomasse algale des communautés phytoplanctoniques guyanaises montre une réponse particulière, faible, aux gradients de trophie, ce qui souligne que d'autres caractéristiques locales seraient mieux à même d'expliquer ces biomasses. Les particularités du phytoplancton guyanais limitent les performances de la méthode métropolitaine déjà existante. Nous pouvons quand même souligner les bonnes performances de certaines métriques de la méthode métropolitaine (la MG-P et la MG-A), qui sont bien corrélées avec les concentrations en phosphore total et qui discriminent bien les situations impactées des situations de référence.

Le développement d'une méthode spécifiques aux GCE guyanais pourra donc s'appuyer sur ces premiers résultats. Néanmoins, l'analyse des données disponibles a révélé de multiples limites inhérentes, qui pourraient limiter la robustesse de la future méthode. Ces limites identifiées nous ont permis d'établir une série de préconisations, présentées ci-dessous.

IV.1 Importance des performances des mesures physico-chimiques

Notre première préconisation concerne l'importance de chercher à augmenter, dans la mesure du possible, la sensibilité des mesures physico-chimique pour les faibles valeurs. En effet, lors de l'étude des données disponibles pour les GCE guyanais nous avons été confrontés à un nombre souvent important de mesures égales aux limites de quantification (LQ). Ces mesures limitent les performances des métriques développées, surtout pour des mesures avec de faibles valeurs, proches ou égales aux LQ, de par la distribution discontinue, parfois discrète, induite par ces mesures. Ces distributions « tronquées » sont souvent observables sous la forme de lignes de points présentant une même valeur (égale à une LQ) pour différentes valeurs d'une métrique donnée (visibles par exemple pour les deux premiers nuages de points de la Figure 14).

Or il s'avère que le développement d'une méthode de bioindication nécessite une phase de validation de l'indice et/ou des métriques développés par l'évaluation de leurs performances à restituer les gradients de pression. Dans le cas d'une méthode basée sur le phytoplancton, le principal gradient d'intérêt est un gradient

d'eutrophisation, lié par exemple à des concentrations élevées en azote et/ou phosphore, car il s'agit d'un gradient auquel la biomasse phytoplanctonique répond bien (Mischke et al. 2016). D'après la DCE, une méthode basée sur le phytoplancton doit, de plus, intégrer une métrique de biomasse. Les biomasses phytoplanctoniques ne peuvent être estimées que de manière indirecte, généralement en mesurant les concentrations en chlorophylle-a. Ainsi, le développement d'une méthode de bioindication robuste basée sur le phytoplancton nécessite, dans la mesure du possible, d'avoir un jeu de donnée décrivant des gradients suffisamment étendus pour les principaux composés phosphorés et azotés et pour les concentrations en chlorophylle-a.

Pour les paramètres chimiques telles que les composés azotés ou phosphorés, la fréquence plus ou moins importante de ces mesures égales aux LQ s'expliquent par le faible niveau de trophie des cours d'eau guyanais en général (par ex., la Figure 3). D'une manière générale, les conditions locales (difficulté d'accès aux sites, impossibilité de faire certaines mesures *in situ*) peuvent aussi parfois expliquer pourquoi les valeurs de certains paramètres peuvent être faibles, peu robustes et/ou peu représentatives. C'est par exemple le cas des concentrations en chlorophylle-a, dont les mesures peuvent être dégradées par le délai plus important qu'en métropole entre le prélèvement et l'analyse. De plus, des ruptures dans la chaîne du froid peuvent se produire durant la phase de transport jusqu'au laboratoire (cela est d'autant plus vrai pour les échantillons transférés en métropole pour analyses). Néanmoins, le bureau d'étude Hydreco, qui réalise les prélèvements en Guyane, a amélioré ses protocoles de prélèvement et de conservations des échantillons d'eau depuis quelques années afin de pallier ces problèmes (par exemple, filtrations *in situ* et congélations des échantillons destinés au dosage de la chlorophylle-a).

De plus, une augmentation de la taille du jeu de données dans les prochaines années, via la poursuite des suivis sur les GCE guyanais, devrait permettre *in fine* de limiter les biais liés aux mesures égales aux LQ en augmentant mécaniquement le nombre de mesures réparties sur l'intégralité du gradient (déjà) décrit, et donc la robustesse des relations observées entre métriques et paramètres d'intérêt.

IV.2 Fréquence d'échantillonnage

D'après les critères de la DCE, une méthode basée sur le phytoplancton doit être à même de mettre en évidence l'intensité et la fréquence des efflorescences algales (Annexe 5 de la DCE ; European Council 2000). Pour les méthodes développées pour le suivi des GCE d'Europe continentale, il a ainsi été préconisé d'effectuer au moins six prélèvements phytoplanctoniques au cours d'une même saison de végétation.

Par extension, la réalisation d'au moins six prélèvements phytoplanctoniques permet aussi d'augmenter la robustesse de l'évaluation de l'état écologique (Mischke

et al. 2016). En effet, la réalisation d'un unique prélèvement au cours d'une année pourrait mener à une évaluation biaisée, par exemple si ce prélèvement est réalisé au cours d'un évènement ponctuel non-représentatif des conditions habituellement observées pour une station donnée.

Ainsi, il serait opportun d'augmenter la fréquence d'échantillonnage des GCE guyanais, afin d'augmenter la robustesse de l'évaluation écologique tout en prenant en compte la possible variabilité temporelle des communautés phytoplanctoniques. Néanmoins, nous nous devons de rester pragmatiques : il n'est pas techniquement réaliste, ni réellement envisageable, de multiplier les campagnes de prélèvements sur l'intégralité des GCE guyanais, de par la difficulté d'accès à certaines stations. Cependant nous pouvons évoquer l'existence d'un ensemble de stations appartenant au RCO et bénéficiant déjà d'un suivi régulier des paramètres physico-chimiques de l'eau. Ces stations sont suivies au moins quatre fois par an, à raison d'un prélèvement par mois. En fonction de la pertinence de ces stations, il serait éventuellement envisageable de coupler un prélèvement phytoplanctonique à ces prélèvements d'eau afin de bénéficier d'un ensemble d'OPC avec une fréquence plus élevée de prélèvements floristiques. Cela augmenterait possiblement le nombre de stations, du jeu de données, plus impactées par diverses pressions d'origine anthropique (cf. préconisation suivante). Ces données supplémentaires permettraient de surcroît de vérifier comment évoluent les communautés phytoplanctoniques durant une même période d'étiage.

IV.3 Gradient(s) de pression : sites de références et sites impactés

Comme déjà évoqué ci-dessus, il est important d'avoir des gradients de valeurs pour les principaux paramètres physico-chimiques d'intérêt suffisamment étendus et correctement décrits afin de développer des méthodes de bioindication robustes et pertinentes. À ce titre, il pourrait être pertinent d'inclure de nouvelles stations GCE impactées, par exemple par une trophie plus importante de l'eau, aux stations déjà concernées par un suivi phytoplanctonique qui sont, de manière générale, faiblement impactées par des activités anthropiques.

Dans la section consacrée à l'analyse des données phytoplanctoniques (§II.4), nous avons mis en évidence que les stations localisées sur le Maroni présentent des communautés phytoplanctoniques avec une structure et une composition différentes de celles observées pour les autres cours d'eau et stations. Cette observation plaide en faveur du suivi de nouvelles stations localisées en amont sur le Maroni, donc peu ou pas impactées par les activités humaines, afin de prendre en compte les caractéristiques intrinsèques, possiblement d'origine biogéographique, de ces communautés. En effet, il aurait été regrettable de déclasser l'état écologique des stations déjà suivies sur le Maroni uniquement parce qu'elles présentent des communautés phytoplanctoniques différentes de celles observées ailleurs en Guyane. Le suivi d'une ou plusieurs stations de référence sur le Maroni permettrait de conclure

si ces différences observées pour les stations actuelles sont effectivement d'origine anthropique, et indicatrices d'impacts, ou si elles représentent plus simplement les particularités bio-hydrogéographiques du bassin versant concerné et de son pool d'espèces.

En accord avec les préconisations précédentes, le suivi de ces nouvelles stations, impactées ou non, permettra en plus d'augmenter la taille du jeu de données consacrées au développement de la future méthode.

Nous pouvons d'ores-et-déjà signaler que 30 stations du réseau RCS ont bénéficié exceptionnellement cette année (2023) d'un prélèvement phytoplanctonique, au lieu des 11 stations suivies classiquement. Parmi ces 30 stations nous pouvons noter 1 nouvelle station en amont sur l'Oyapock, 2 stations localisées sur le Maroni médian, et 1 autre sur un affluent du Maroni (partie amont). Ces nouvelles stations sont localisées sur des cours d'eau continentaux (c'est-à-dire sans possible influence marine), avec des classes de taille comprises entre « Moyenne » et « Très Grande », et présentant une largeur suffisamment importante pour que le couvert forestier soit limité. Certaines de ces nouvelles stations ont vocation à être suivies régulièrement dans le futur. Ce suivi exceptionnel (et pérenne pour certaines de ces stations) répond donc déjà à la préconisation présentée dans cette section. Les nouvelles stations sont localisées sur la Figure 18.

IV.4 Description des traits fonctionnels des taxons

Les performances des métriques fonctionnelles calculées à partir de la base de données de traits existante sont les meilleures globalement pour l'ensemble des métriques « classiques » testées sur ce jeu de données préliminaires (*i.e.* à l'exclusion des métriques TITAN). Ces bonnes performances ont été observées malgré le fait que les traits décrits ont été bancarisés pour des taxons rencontrés en France métropolitaine et à partir de publications essentiellement européennes (Laplace-Treyture et al. 2021).

Ainsi, nous pouvons émettre l'hypothèse que la constitution d'une base de données de traits fonctionnels ciblant les taxons rencontrés en Guyane (avec au moins 15 occurrences, pour rester cohérent avec ce qui a été fait en France métropolitaine ; Laplace-Treyture et al. 2021) et incluant une description des traits réalisée de préférence dans des régions tropicales, de préférence en Amérique du Sud, pourra permettre dans le futur le développement de métriques fonctionnelles présentant une meilleure performance que celles déjà observées.

La constitution d'une telle base de données est généralement chronophage, donc elle ne devrait être réalisée que si la méthode choisie pour le développement futur de la méthode guyanaise le requiert.

Réseau de contrôle de surveillance des cours d'eau - Biologie

2023



Réalisation : DGTM Guyane/PEB/UMAPE
Sources : DGTM Guyane

Figure 18 Localisation des stations dont la biologie a été suivie en 2023.

IV.5 Perspectives

Le développement d'une future méthode spécifique à la Guyane pourra se faire via différentes approches. Les relatives bonnes performances des métriques de l'IPHYGE montrent que l'approche utilisée, basée sur le calcul de métriques de composition à partir de préférences écologiques de taxons pour des paramètres d'intérêt, pourrait s'avérer pertinente pour les GCE guyanais. Néanmoins, l'IPHYGE et ses métriques ont montré une efficacité de discrimination limitée, possiblement parce que les pressions, principalement trophiques, révélées par ces métriques et par l'indice ne permettent pas de bien retranscrire l'intégralité des pressions anthropiques impactant ces GCE guyanais, comme l'orpaillage. Il serait donc sans doute pertinent de développer une métrique spécifique, par exemple basée sur les préférences écologiques des taxons vis-à-vis de la turbidité et des MES.

L'approche TITAN a déjà fait ses preuves sur ce petit jeu de données préliminaires. La meilleure métrique pour les MES montre par exemple une bonne DE, ce qui semble confirmer *a posteriori* l'importance de prendre en compte les MES dans une évaluation écologique basée sur le phytoplancton. Pour le moment la limite de l'approche TITAN réside dans le faible nombre de taxons d'alerte pour chacun des trois paramètres d'intérêt, ce qui diminue la robustesse de cette approche. L'augmentation de la taille du jeu de données dans les prochaines années devrait permettre d'identifier plus de taxons d'alerte et/ou d'identifier des taxons d'alerte plus robustes (avec une pureté et une fiabilité plus élevées).

Une dernière approche envisageable est l'approche qui a été utilisée pour le développement de l'Indice Biotique Macroinvertébrés de Guyane (Dedieu 2015, Dedieu et al. 2016). Cette approche consiste à agréger des métriques sélectionnées pour leur caractère généraliste (c'est-à-dire dont les valeurs reflètent bien le niveau global d'impact d'une station, et non pas spécifiquement certaines pressions) et pour leur bonne efficacité de discrimination. Cette approche a le mérite d'être moins dépendante des gradients de valeurs des différents paramètres d'intérêt, tout en permettant d'avoir un indice final avec une bonne efficacité de discrimination. Par exemple, les métriques fonctionnelles étudiées ici ont déjà fait preuve d'une bonne efficacité de discrimination. De plus, l'utilisation de métriques fonctionnelles dans cette approche permet aussi de s'affranchir en partie de la taxonomie, et donc par extension d'éventuels biais liés à des erreurs de détermination.

Quelle que soit l'approche qui sera finalement sélectionnée, il faudra résoudre le problème de l'inclusion d'une métrique de biomasse algale. L'inclusion d'une telle métrique est (en théorie) nécessaire afin de respecter les critères de la DCE. Dans le futur, il sera sans doute possible d'utiliser les concentrations en chlorophylle-a pour calculer cette métrique, surtout avec l'amélioration de l'ensemble du processus permettant sa mesure (cf. §IV.1), mais dans ce cas-là il faudrait éventuellement exclure les valeurs les plus anciennes, moins fiables. Il pourrait aussi être envisagé de calculer les valeurs d'une telle métrique de biomasse à partir du biovolume total, voire éventuellement à partir de la somme des concentrations en chlorophylle-a et en

phéopigments. En effet, les phéopigments semblent être un bon proxy des biomasses (cf. la corrélation positive entre biovolume total et phéopigments de la Figure S1 dans les Annexes).

Dans tous les cas, la poursuite du suivi du phytoplancton dans les GCE guyanais déjà surveillés et l'ajout de stations supplémentaires, plus ou moins impactées, devrait permettre le développement d'une méthode robuste de bioindication basée sur le phytoplancton et spécifique aux GCE guyanais d'ici 3 à 5 ans.

V. Références

- Abonyi, A., Kiss, K. T., Hidas, A., Borics, G., Várbíró, G., & Ács, É. (2020).** Cell Size Decrease and Altered Size Structure of Phytoplankton Constrain Ecosystem Functioning in the Middle Danube River Over Multiple Decades. *Ecosystems*, 23(6), 1254-1264. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00467-6>
- Baker, M. E., King, R. S., & Kahle, D. (2023).** TITAN2 : Threshold Indicator Taxa Analysis (R package version 2.4.2) [Logiciel]. <https://CRAN.R-project.org/package=TITAN2>
- Carayon, D., Delmas, F., Garrigue, A. E., & Vigouroux, R. (2019).** Evaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane : Un nouvel indice diatomique pour la Guyane Française (l'IDGF): Rapport final (V1 du 30-04-2019) (123 p.) <https://hal.inrae.fr/hal-02609634>
- Carayon, D., Eulin-Garrigue, A., Vigouroux, R., & Delmas, F. (2020).** A new multimetric index for the evaluation of water ecological quality of French Guiana streams based on benthic diatoms. *Ecological Indicators*, 113, 106248. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106248>
- Dedieu, N. (2015).** Mise au point d'un outil d'évaluation de la qualité biologique des petites rivières de Guyane sur la base des invertébrés benthiques [Mémoire de thèse, Université Toulouse III Paul Sabatier]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01116064>
- Dedieu, N., Clavier, S., Vigouroux, R., Cerdan, P., & Céréghino, R. (2016).** A Multimetric Macroinvertebrate Index for the Implementation of the European Water Framework Directive in French Guiana, East Amazonia : A biotic index for East-Amazonian streams. *River Research and Applications*, 32(3), 501-515. <https://doi.org/10.1002/rra.2874>
- Derot, J., Jamoneau, A., Teichert, N., Rosebery, J., Morin, S., & Laplace-Treyture, C. (2020).** Response of phytoplankton traits to environmental variables in French lakes : New perspectives for bioindication. *Ecological Indicators*, 108, 105659. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105659>
- DIREN Guyane (2009).** Réseau de Référence et de Surveillance des eaux superficielles de Guyane. Phytoplancton. Campagne 2008 (28 p.).
- DIREN Guyane (2010).** Valorisation des données du réseau de Référence et de Surveillance des eaux superficielles de Guyane. Phytoplancton. Campagne 2008. Année 2010 (21 p.).
- Dray, S., & Dufour, A.-B. (2007).** The ade4 Package : Implementing the Duality Diagram for Ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22(4), 1-20. <https://doi.org/10.18637/jss.v022.i04>
- European Council (2000).** Directive 2000/60/EC. Establishing a framework for community action in the field of water policy. European Commission PE-CONS 3639/1/100 Rev 1, Luxembourg.
- Graves, S., Piepho, H.-P., Selzer, L., & Dorai-Raj, S. (2019).** multcompView : Visualizations of Paired Comparisons (R package version 0.1-8) [Logiciel]. <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>
- Laplace-Treyture, C., Derot, J., Prévost, E., Le Mat, A., & Jamoneau, A. (2021).** Phytoplankton morpho-functional trait dataset from French water-bodies. *Scientific Data*, 8(1), 40. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00814-0>
- Meyer, A., Coulaud, R., Vellinger, C., Chardon, T., & Usseglio-Polatera, P. (2020).** Diagnostic écologique multi-compartiments des cours d'eau. Action 1 : Définition des conditions de référence pour les Grands Cours d'Eau (GCE) et les Très Grands Cours d'Eau (TGCE), action 2 : Proposition d'une version opérationnelle de l'indice I2M2-GCE et action 3 : Proposition d'un outil diagnostique pour les Grands Cours d'Eau (88 p.). Université de Lorraine (LIEC) pour l'OFB.
- Meyer, A., Prygiel, E., & Laplace-Treyture, C. (2021).** DIPCEAU : Développement d'un Indicateur Phytoplancton pour l'évaluation de l'état écologique des Grands Cours d'Eau—Action 1 : Revue des indicateurs européens (86 p.). INRAE, Cerema, OFB.
- Meyer, A., Prygiel, E., & Laplace-Treyture, C. (2023).** DIPCEAU : Développement d'un Indicateur Phytoplancton pour l'évaluation de l'état écologique des Grands Cours d'Eau—Action 3 : Mise au point de l'indicateur v0. Croisement des données, création et sélection de métriques (92 p.). INRAE, Cerema, OFB.

- Mischke**, U., Wolfram, G., VanWichelen, J., Hlúbiková, D., Belkinova, D., Opatrilova, L., Birk, S., Piirsoo, K., Stanković, I., Varbiro, G., Borics, G., Jekabsone, J., Stankeviciene, J., Virbickas, T., Picińska-Fałtynowicz, J., Panek, P., Rotaru, N., Garbea, R., & Placha, M. (2016). XGIG Large River Intercalibration Exercise – Milestone 6 Report Intercalibrating the national classifications of ecological status for very large rivers in Europe Biological Quality Element : Phytoplankton 2. Version – November 2016 (157 p.).
- Mondy**, C. P., & Usseglio - Polatera, P. (2014). Using fuzzy-coded traits to elucidate the non-random role of anthropogenic stress in the functional homogenisation of invertebrate assemblages. *Freshwater Biology*, 59(3), 584-600. <https://doi.org/10.1111/fwb.12289>
- Oksanen**, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, H. H., Szoecs, E., & Wagner, H. (2020). *vegan* : Community Ecology Package [Logiciel]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pianka**, E. R. (1974). Niche Overlap and Diffuse Competition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 71(5), 2141-2145. <https://doi.org/10.1073/pnas.71.5.2141>
- Pohlert**, T. (2022). *PMCMRplus* : Calculate Pairwise Multiple Comparisons of Mean Rank Sums Extended (R package version 1.9.4) [Logiciel]. <https://CRAN.R-project.org/package=PMCMRplus>
- R Core Team** (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rao**, C. R. (1982). Diversity and dissimilarity coefficients : A unified approach. *Theoretical Population Biology*, 21(1), 24-43. [https://doi.org/10.1016/0040-5809\(82\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0040-5809(82)90004-1)
- Shannon**, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 and 623-656.
- Tachet**, H., Richoux, P., Bournaud, M., & Usseglio-Polatera, P. (2010). *Invertébrés d'eau douce : Systématique, biologie, écologie* (Nouvelle éd. revue et augmentée). CNRS éd.
- Tejerina-Garro**, F. L., De Mérona, B., Oberdorff, T., & Hugueny, B. (2006). A fish-based index of large river quality for French Guiana (South America) : Method and preliminary results. *Aquatic Living Resources*, 19(1), 31-46. <https://doi.org/10.1051/alr:2006003>
- Thomas**, A., Orth, K., & Dominique, Y. (2001). Etude des éphéméroptères de la Guyane française : Systématique, répartition géographique et élaboration d'un indice de qualité des eaux (SMEG) (Annexe 6) ; dans IRD - Qualité des eaux de rivières de Guyane (p.84).
- Wickham**, H. (2016). *ggplot2* : Elegant graphics for data analysis (Second edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Zeileis**, A., & Hothorn, T. (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R NEws*, 2(3), 7-10.
- Zelinka**, M., & Marvan, P. (1961). Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Arch. Hydrobiol.*, 57, 389-407.

VI. Annexes

VI.1 Figure supplémentaire

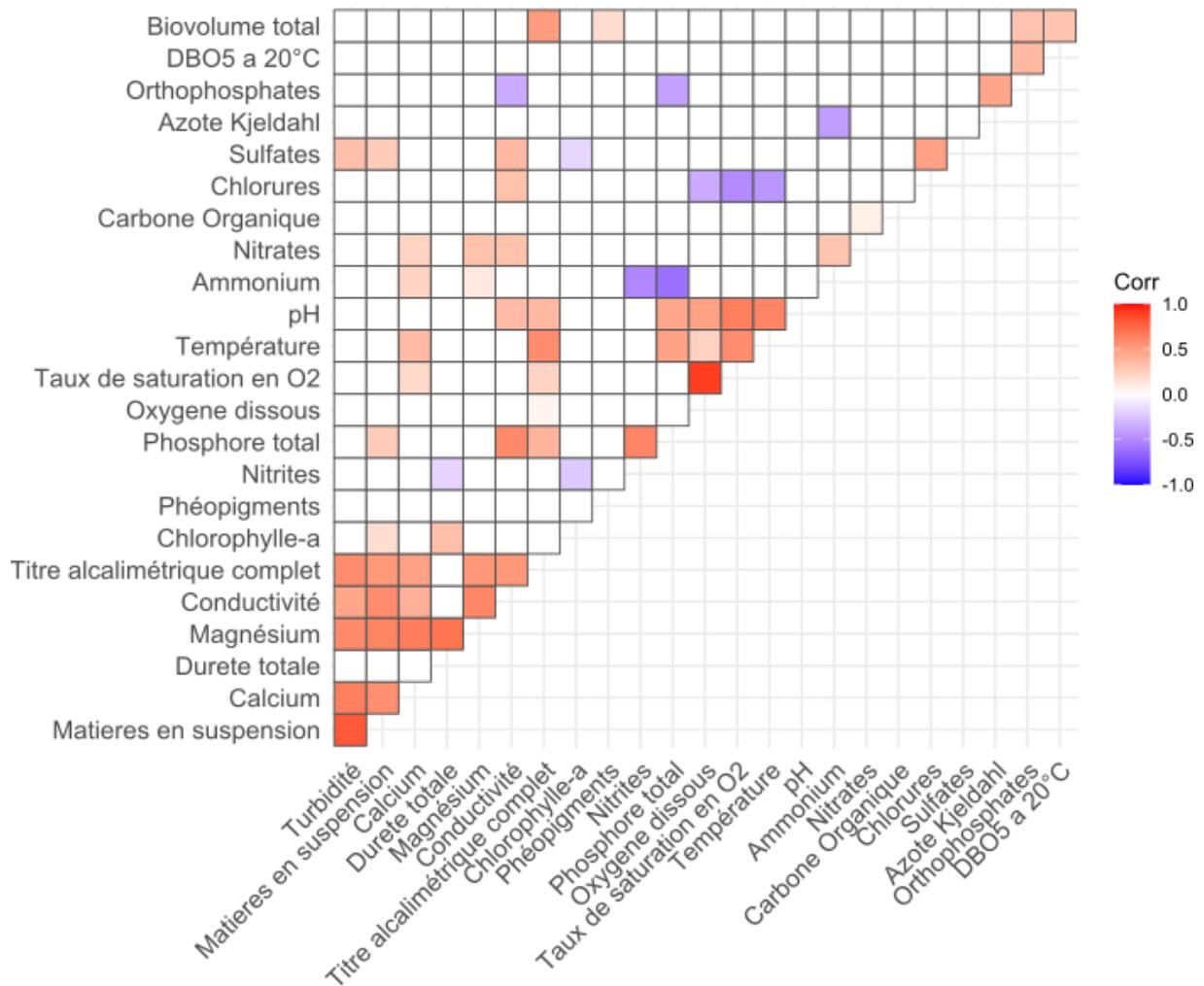


Figure S1 Matrice de corrélation de Spearman entre les valeurs des 23 paramètres et les valeurs de biovolume total. Les cases colorées indiquent les corrélations statistiquement significatives au seuil $\alpha = 0,05$.

VI.2 Tableau supplémentaire

Tableau S1 Détails des niveaux de pression décrits pour les stations GCE guyanaises. ABS Absente, ELEV Elevée, MIN Minimale, MOD Modérée, NS Non-Significative, SIG Significative.

Station	Déchets	Prélèvements	Carrière	Aurifère	Agricole (azote)	Agricole (phytosanitaire)	Pêche	Continuité hydrologique	Hydrologie	Hydromorphologie
TWEN	NS	ABS	ABS	SIG	ABS	ABS	MOD	MOD	MIN	MIN
PAPA	SIG	NS	ABS	SIG	MIN	MOD	ELEV	MIN	MIN	ELEV
LANG	NS	ABS	ABS	SIG	ABS	ABS	ELEV	MOD	MIN	ELEV
APAT	NS	NS	NS	SIG	MIN	MIN	ELEV	MOD	MIN	ELEV
LEZA	ABS	ABS	ABS	NS	ABS	ABS	MOD	MIN	MIN	MOD
ANGO	ABS	NS	SIG	ABS	MOD	ELEV	MOD	MIN	MIN	A expertiser
PATA	ABS	NS	ABS	ABS	MIN	MOD	MOD	MIN	MIN	MIN
ATHA	ABS	ABS	ABS	NS	ABS	ABS	MIN	MIN	MIN	MOD
FOUR	ABS	ABS	ABS	NS	ABS	ABS	MIN	MIN	MIN	MOD
DEGC	ABS	NS	ABS	SIG	MIN	MOD	MOD	MIN	MIN	MOD
CACV	NS	NS	ABS	NS	MIN	MOD	MIN	MIN	MIN	MOD

Résumé

Le projet Eauyapoc-Faisabilité a comme objectif d'étudier la possibilité de développer un indicateur multi-métrique basé sur la communauté phytoplanctonique des grands cours d'eau (GCE) guyanais. Dans le cadre de ce projet nous avons bancarisé les données physico-chimiques, mésologiques et phytoplanctoniques disponibles pour les onze stations concernées. Ces données ont été utilisées afin de décrire les gradients de pressions observées. Les données phytoplanctoniques ont servi à calculer de nombreuses métriques, que ce soit des métriques de biomasse phytoplanctonique, des métriques structurelles, des métriques fonctionnelles, ou des métriques de bioindication.

L'analyse des résultats obtenus a permis de mettre en évidence que les données déjà acquises sur les GCE guyanais pourraient, en théorie, permettre le développement d'une méthode phytoplanctonique spécifique à ces cours d'eau. En effet, certaines des métriques calculées sur ces données sont capables de bien restituer différents gradients de paramètres physico-chimiques, signes de possibles impacts anthropiques, qu'il s'agisse des paramètres azotées, phosphorées ou des matières en suspension. Ces résultats ont aussi mis en évidence la nécessité de développer une méthode spécifique à la Guyane.

Néanmoins, l'étude des données disponibles a aussi révélé certaines limites, qu'elles soient liées à la (petite) taille du jeu de données, aux gradients de pression ou à la précision et à la fréquence des mesures. Ainsi, la dernière partie de ce rapport est consacrée à une série de préconisations qui permettront le développement d'une méthode robuste de bioindication basée sur le phytoplancton pour les GCE guyanais.

Mots-clés

Phytoplancton – bioindicateur – évaluation – état écologique – grands cours d'eau – chlorophylle-a – pressions trophiques

