

OBSLAG - Eutrophisation

Note technique

Evaluation de la robustesse des indicateurs de tendance et de confiance : état physico-chimique de l'eau et état du phytoplancton des lagunes méditerranéennes



Vue aérienne du grau de la lagune de l'Ayrolle (octobre 2017) © Henri Farrugio, Ifremer.

Avec le soutien de :



Fiche documentaire

Titre du rapport : OBSLAG - Eutrophisation. Note technique. Evaluation de la robustesse des indicateurs de tendance et de confiance : état physico-chimique de l'eau et état du phytoplancton des lagunes méditerranéennes	
Référence rapport : ODE/UL/LER-LR/23.01 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> Libre (internet) <input type="checkbox"/> Restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> Interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAAA/MM/JJ	Date de publication : août 2023 Version : 1.0.0 Référence de l'illustration de couverture Crédit photo : Henri Farrugio, Ifremer. Langue(s) : français
Résumé/Abstract : <p>Dans le cadre d'OBSLAG (Observatoire des Lagunes), les résultats des diagnostics de l'état des compartiments physico-chimique et phytoplanctonique au regard de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) sont complétés d'évaluations de tendance des indicateurs sur les 10 masses d'eau lagunaires de l'observatoire. Ces éléments rendent compte de manière visuelle et synthétique : i) des évolutions, au sein d'une période de diagnostic (6 étés), de l'état des lagunes vis-à-vis de l'eutrophisation, et ii) de l'incertitude des diagnostics tel qu'exigé par la DCE. A l'issue des trois premières périodes de diagnostic OBSLAG-eutrophisation menées depuis 2016 sur les lagunes méditerranéennes d'Occitanie, PACA et Corse, l'objectif de cette note technique est d'évaluer la robustesse des indicateurs en termes de : 1) sensibilité de l'indicateur de tendance ; 2) potentiel communicatif des indicateurs de confiance.</p> <p>A partir des diagnostics de l'état physico-chimique de l'eau et de l'état du phytoplancton recueillies de 2009 à 2021 (8 périodes de diagnostic de 6 années), une analyse de la concordance des tests de tendance vis-à-vis des observations des périodes suivantes est effectuée. Les résultats montrent que les tests ont une relativement bonne spécificité pour les deux éléments de qualité et une sensibilité relativement bonne pour l'eau, mais faible pour le phytoplancton.</p> <p>A l'issue de cette synthèse, des perspectives sont identifiées pour : i) davantage valoriser les indicateurs de confiance dans les rapports OBSLAG, afin d'apporter plus de finesse aux diagnostics et d'alerter les gestionnaires sur des phénomènes de dégradation ; ii) produire régulièrement des traitements des données à échelle temporelle longue ; iii) enrichir les observations (échantillonnage estival bi-mensuel voire saisonnier, ajout d'une métrique de composition du phytoplancton ; iv) davantage confronter les résultats des indicateurs aux pressions subies par les lagunes (pollution anthropique et fluctuations hydro-météorologiques).</p>	
Mots-clés : Directive Cadre sur l'Eau (DCE), lagunes, masses d'eau de transition, eutrophisation, phytoplancton, confiance, précision, tendance.	
Comment citer ce document : Derolez V. et Cimiterra N. (2023). OBSLAG - Eutrophisation. Note technique. Evaluation de la robustesse des indicateurs de tendance et de confiance : état physico-chimique de l'eau et état du phytoplancton des lagunes méditerranéennes. 38 p.	
Disponibilité des données de la recherche : Données bancarisées dans Q ² , accessibles à tous via le portail SURVAL (https://surval.ifremer.fr/ ; programme RSLHYD).	
DOI : https://doi.org/10.13155/95649	

Commanditaire du rapport : AERMC Montpellier	
Nom / références du contrat : PROJET OBSLAG : Suivi des lagunes des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse 2022-2023 / Convention n°21/1002385 <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport Final de contrat	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit : OBServatoire des LAGunes (OBSLAG) : Suivi des lagunes du bassin RMC	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service
Valérie DEROLEZ ¹ , valerie.derolez@ifremer.fr	1) Ifremer ODE/UL/LERLR (Laboratoire Environnement Ressources d'Occitanie), Sète – MARBEC, Univ. Montpellier, Ifremer, IRD, CNRS
Nicolas CIMITERRA ¹ nicolas.cimiterra@ifremer.fr	2) Ifremer ODE/VIGIES, Nantes 3) Université de Montpellier – MARBEC, Univ. Montpellier, Ifremer, IRD, CNRS 4) AERMC, délégation de Montpellier 5) Ifremer ODE/UL/LERPAC (Laboratoire Environnement Ressources Provence-Alpes-Côte d'Azur), La Seyne/mer
Sincères remerciements aux autres contributeurs de cette étude (ordre alphabétique) : Rémi BUCHET ² , Olivier HERLORY ⁵ et Dominique SOUDANT ² pour la relecture et les corrections apportées à cette note. Béatrice BEC ³ , Coralie CONNES ⁴ , Elodie FOUCAULT, Emeric GAUTIER ² , Elise HATEY ² , Nathalie MALET ⁴ , Grégory MESSIAEN ¹ et Dominique MUNARON ¹ pour leurs contributions aux prélèvements et analyses des données traitées dans cette note. Anaïs GIRAUD ⁴ pour la coordination des projets d'observation et de recherches sur les lagunes méditerranéennes financées par l'Agence de l'Eau RMC. Merci également à l'ensemble des personnels Ifremer des Laboratoires-Environnement-Ressources du Languedoc-Roussillon (LER/LR) et de Corse (LER/PAC/CO) et de l'équipe VIGIES de Nantes ; l'UMR MARBEC ; les structures de gestion des lagunes : le Syndicat Mixte du Bassin de Thau, le Syndicat Mixte des Etangs Littoraux, le Syndicat Mixte du Bassin de l'Or, le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, le Syndicat Mixte de Gestion Intégrée, Prospective et Restauration de l'Étang de Berre, le Syndicat Mixte du Delta de l'Aude, le Syndicat Mixte du Bassin Versant du Réart, Perpignan Méditerranée et la Réserve Naturelle de l'Étang de Biguglia.	
Validé par : Olivier HERLORY ⁵	

Sommaire

1	Contexte et objectifs de cette note technique.....	6
2	Données et méthodes	8
2.1	Données considérées.....	8
2.2	Indicateurs mobilisés.....	9
2.2.1	Indicateurs et grilles de diagnostic de la « physico-chimie de l’eau » et du « phytoplancton »	9
a)	Agrégation spatiale et temporelle des données	9
b)	Etat physico-chimique de l’eau	9
c)	Etat du phytoplancton.....	10
2.2.2	Indicateurs de confiance et mise en évidence de tendance et d’années particulières 10	
a)	Indicateurs de confiance	11
b)	Mise en évidence de tendances et d’années particulières	11
2.3	Méthode suivie pour évaluer la robustesse des indicateurs.....	12
2.3.1	Changements de classe et tendances d’évolution	12
2.3.2	Evolutions à long terme (périodes de diagnostic disjointes).....	13
2.3.3	Potentiel communicatif des indicateurs de variabilité.....	14
3	Résultats et discussion	15
3.1	Changements de classes et tendances d’évolution.....	15
3.1.1	Bilan de l’ensemble des diagnostics	15
3.1.2	Passages du seuil « Bon-Moyen »	17
3.2	Evolution à long terme (périodes de diagnostic disjointes)	24
3.3	Potentiel communicatif des indicateurs de variabilité.....	25
4	Conclusions et perspectives	27
5	Bibliographie.....	29
6	Annexes	31
6.1	Glossaire (d’après Belin <i>et al.</i> , 2014 et Brun et Soudant, 2015)	31
6.2	Méthode du bootstrap appliquée pour le calcul des intervalles de confiance (Soudant, 2008) 32	
6.3	Tests de Mann Kendall et de Kruskal-Wallis.....	33
6.4	Dénombrements des cas de vrais/faux positifs et négatifs pour l’estimation de la sensibilité et de la spécificité du test de Mann Kendall	33
6.5	Représentation de l’amplitude des intervalles de confiance	35

1 Contexte et objectifs de cette note technique

Les compartiments physico-chimique et phytoplanctonique des écosystèmes des lagunes méditerranéennes françaises sont les plus réactifs aux pressions anthropiques et changements globaux. Dans le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), leurs états sont évalués depuis 2006 à l'aide d'indicateurs assortis d'indices de précision et de confiance (Andral et Derolez, 2007 ; Andral et Orsoni, 2007). Depuis 2016, dans le cadre d'OBSLAG (Observatoire des Lagunes), ces résultats sont présentés et complétés d'évaluations de tendance des indicateurs sur les 10 masses d'eau lagunaires de l'observatoire. L'ensemble de ces éléments sont calculés pour des périodes de diagnostic de 6 ans, à l'aide des données recueillies lors des campagnes estivales réalisées. Ainsi, ils rendent compte de manière visuelle et synthétique (*Figure 1*) : *i*) des évolutions, au sein d'une période de diagnostic, de l'état des lagunes vis-à-vis de l'eutrophisation, l'une des principales dégradations résultant des pressions humaines pesant sur ces écosystèmes méditerranéens et *ii*) de l'incertitude des diagnostics DCE, tel qu'exigé par cette Directive (article 1.3). Cela correspond à plusieurs qualités attendues pour les indicateurs DCE (*Figure 2*, Brun et Soudant, 2015).

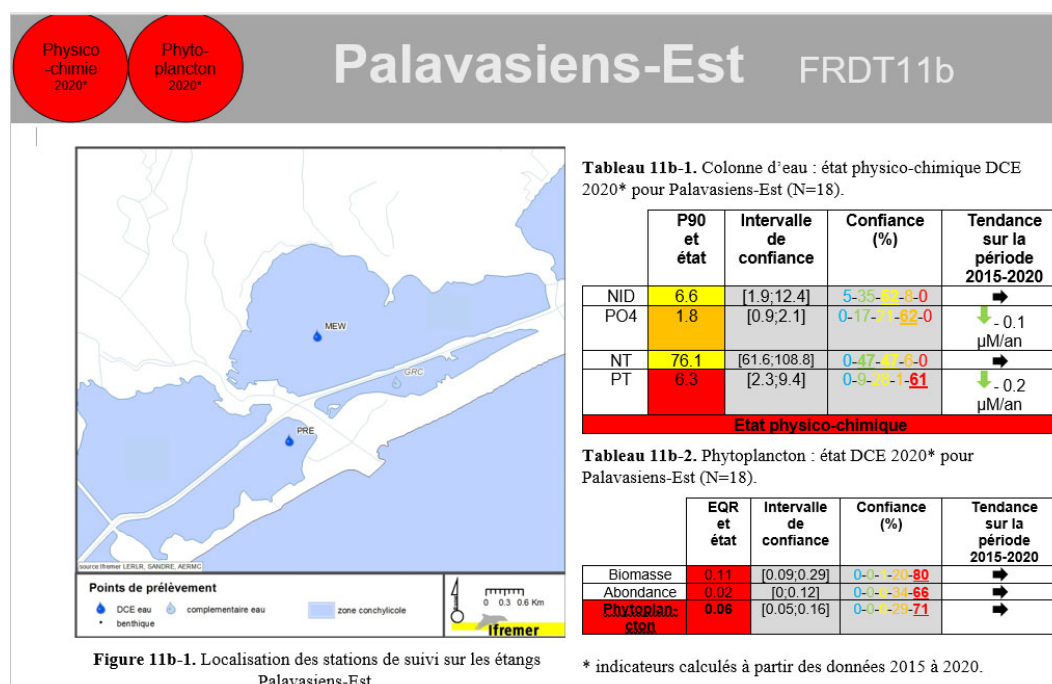


Figure 1. Extrait d'une fiche OBSLAG pour la masse d'eau « Palavasiens-Est » pour la période 2015-2020 (Derolez *et al.*, 2021).

A l'issue des trois premières périodes de diagnostic OBSLAG-eutrophisation menées depuis 2016 sur les lagunes méditerranéennes d'Occitanie, PACA et Corse¹, nous proposons dans cette note technique d'évaluer la robustesse des indicateurs en termes de :

- 1) sensibilité de l'indicateur de tendance ;
- 2) potentiel communicatif des indicateurs de confiance (intervalle de confiance et confiance en % sur la *Figure 1*).

¹ Diagnostics des périodes 2011-2016, 2013-2018 et 2015-2020 (Derolez *et al.*, 2017, 2019 et 2021).

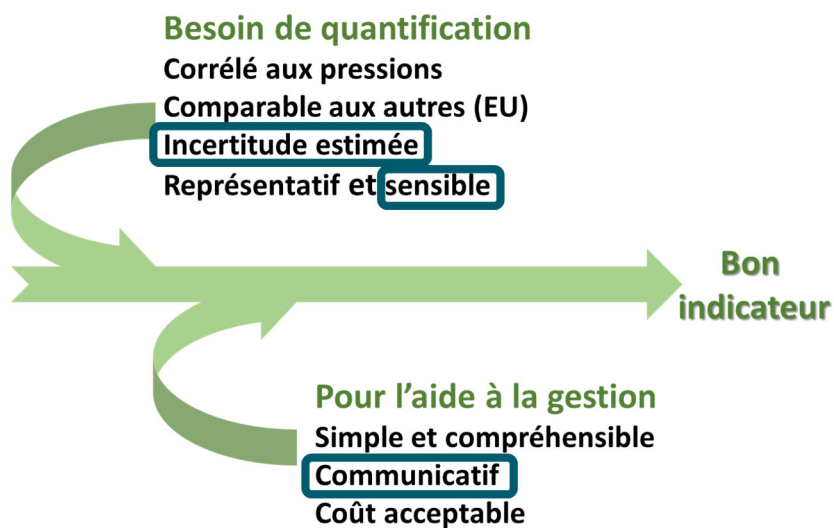


Figure 2. Qualités attendues d'un indicateur d'état écologique (modifié d'après Brun et Soudant, 2015) : les qualités évaluées dans le cadre de ce travail sont encadrées en bleu.

Un glossaire détaillant la signification des termes techniques relatifs aux indicateurs est disponible en Annexe 6.1.

2 Données et méthodes

2.1 Données considérées

L'observatoire OBSLAG est opéré sur 10 masses d'eau lagunaires des côtes d'Occitanie, PACA et Corse (Figure 3), retenues par l'Agence de l'Eau Méditerranéenne Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC) dans le cadre du réseau de suivi des flux de nutriments et de pesticides. Dans cette note technique, nous ne retiendrons que les données acquises sur les 16 stations OBSLAG-eutrophisation² de l'état physico-chimique de l'eau et de l'état du phytoplancton (Figure 3).

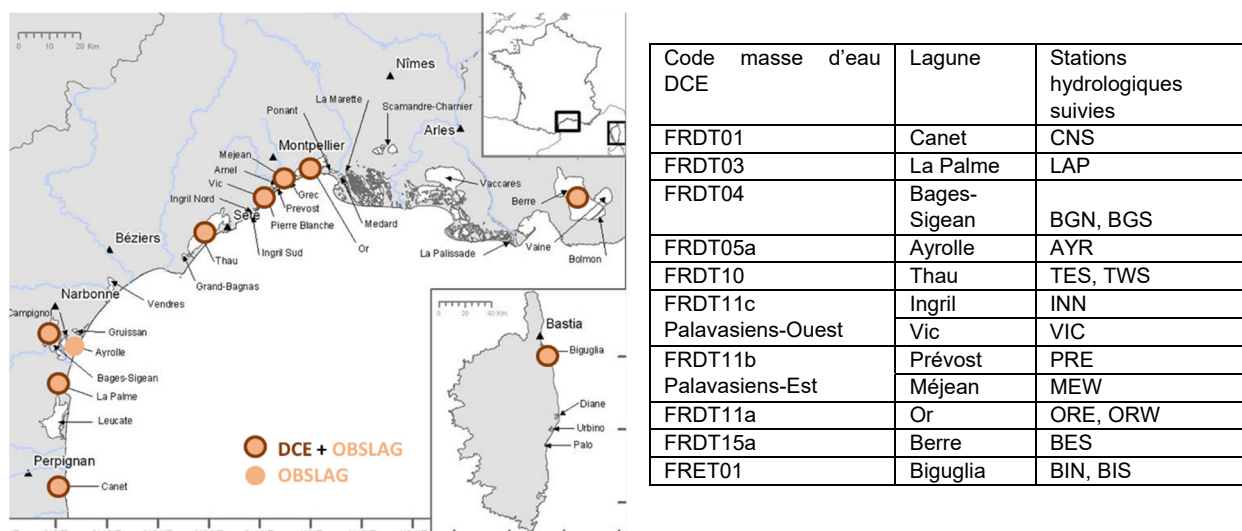


Figure 3. Carte de localisation des 10 masses d'eau lagunaires (entourées : masses d'eau suivies également au titre de la DCE) et tableau des 16 stations suivies dans le cadre d'OBSLAG-eutrophisation.

Les données analysées concernent les années de 2009 à 2021, déclinées en **8 périodes de diagnostic de 6 années**, correspondant au pas de temps des évaluations de l'état physico-chimique de l'eau et de l'état du phytoplancton (**dont les 3 périodes de diagnostic OBSLAG, en gras**) : 2009-2014, 2010-2015, **2011-2016**, 2012-2017, **2013-2018**, 2014-2019, **2015-2020** et 2016-2021.

Les prélèvements d'eau sont mensuels et ciblés sur la période estivale, soit un prélèvement en juin, un en juillet et un en août. Seules les données des prélèvements effectués en sub-surface (0-1 m ou à mi-profondeur pour les lagunes de profondeur inférieure à 3 m) sont considérées dans cette note technique.

Les prélèvements d'eau sont réalisés en grande partie par les laboratoires Ifremer LER/LR et le LER/PAC, avec un soutien des structures de gestion des lagunes. Les analyses de nutriments dans les eaux - azote total (NT), phosphore total (PT), azote inorganique dissout (NID, qui regroupe les nitrites, les nitrates et l'ammonium) et orthophosphates (PO_4^{3-}) -, sont réalisées par le LER/LR, accrédité par le COFRAC³ depuis le 21/01/2014. Les analyses de chlorophylle *a* et d'abondance de pico- et nano-phytoplancton sont réalisées par l'Université de Montpellier. Les méthodes

² Hors stations complémentaires profondes et de bordure suivies au titre d'OBSLAG sur les masses d'eau Berre, Thau et Palavasiens-Est.

³ Accréditation n° 1-1655, portée disponible sur www.cofrac.fr

d'analyses sont détaillées dans la publication de David et al. (2019). Chaque prélèvement est accompagné de mesures *in situ* de température, salinité et oxygène dissous.

Les données sont saisies dans la base Quadrige² et accessibles à tous via le site web Surval⁴. Les indicateurs sont accessibles sur la plateforme MEDTRIX⁵.

2.2 Indicateurs mobilisés

Pour les 8 périodes de diagnostic et les 10 masses d'eau retenues, les résultats des indicateurs de l'état des deux éléments de qualité « physico-chimie de l'eau » et « phytoplancton » sont extraits des rapports DCE et OBSLAG disponibles (Bouchoucha *et al.*, 2019 ; Derolez *et al.*, 2015, 2017, 2019, 2021 ; Herlory *et al.*, 2022 ; Sargian *et al.* 2013a, 2013b ; Witkowski *et al.*, 2016) (§ 2.2.1). Ces données sont complétées par les indicateurs de confiance et de tendance (§ 2.2.2), disponibles dans les rapports OBSLAG pour les 3 diagnostics effectués depuis le début de cet observatoire, et calculés à l'occasion de cette note technique pour les 5 périodes « hors-OBSLAG ».

2.2.1 Indicateurs et grilles de diagnostic de la « physico-chimie de l'eau » et du « phytoplancton »

Les indicateurs, métriques et paramètres des éléments de qualité sont calculés pour chaque masse d'eau lagunaire, après agrégation spatiale et temporelle des données.

a) Agrégation spatiale et temporelle des données

Pour chaque paramètre, une agrégation spatiale et temporelle des données est réalisée (MTES, 2018a, 2018b et 2018c) :

- agrégation spatiale : dans le cas des masses d'eau suivies sur plusieurs stations, les données de chaque paramètre sont agrégées en prenant chaque mois d'été la moyenne des valeurs acquises sur les différentes stations de la masse d'eau ;
- agrégation temporelle : afin de prendre en compte la variabilité interannuelle des paramètres, une agrégation temporelle des données est effectuée. La donnée prise en compte pour chacun des paramètres correspond à la valeur du percentile 90 (P90) calculé à partir des valeurs de chaque mois (moyennées dans le cas de plusieurs stations), sur la période de diagnostic de 6 ans.

b) Etat physico-chimique de l'eau

Dans le cadre des évaluations DCE, l'élément de qualité « physico-chimie de l'eau » des lagunes est évalué en tant que « soutien aux éléments de qualité biologique », c'est-à-dire qu'il ne peut que conduire à déclasser une masse d'eau en-dessous de l'état moyen pour l'état écologique. La grille de diagnostic ci-dessous est utilisée (*Tableau 1*), en retenant l'état le plus déclassant des P90 des 4 paramètres suivis (MTES, 2018a, 2018b et 2018c).

⁴ https://envlit.ifremer.fr/resultats/acces_aux_donnees/presentation, sélectionner le Programme « RSLHYD : Réseau de Suivi des Lagunes méditerranéennes Hydrologie et phytoplancton »

⁵ https://medtrix.fr/portfolio_page/obsflag/

Tableau 1. Grille de diagnostic DCE de l'état physico-chimique des masses d'eau lagunaires.

Paramètre	Unité	Etat								
		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais
[PO ₄ ³⁻]	µmol / l		0,3		1		1,5		4	
[NID]	µmol / l		2		6		10		20	
[NT]	µmol / l		50		75		100		120	
[PT]	µmol / l		2		3		4		5	

c) Etat du phytoplancton

En tant qu'élément de qualité de l'état biologique DCE, le compartiment « phytoplancton » est évalué à l'aide des deux métriques suivantes :

- **biomasse phytoplanctonique** (concentration de chlorophylle *a* en µg/L),
- **abondance phytoplanctonique** (millions de cellules/L), composée de deux paramètres :
 - abondance de nanophytoplancton (diamètre > 3 µm),
 - abondance de picophytoplancton (diamètre < 3 µm).

La valeur de chaque métrique ou paramètre est transformée en valeur de ratio écologique de qualité (EQR) (en relativisant le P90 de la période de diagnostic par rapport à la valeur de référence), puis une intégration des métriques est effectuée pour obtenir l'état du phytoplancton de la masse d'eau :

- la métrique d'abondance (EQR_A) est obtenue en retenant le minimum des EQR des densités de nano- et de pico-phytoplancton,
- l'état du « phytoplancton » (EQR_{PHY}) est obtenu en retenant la moyenne des métriques d'« abondance » (EQR_A) et de « biomasse » (EQR_B) (*Tableau 2*) (MTES, 2018a et 2018c).

Tableau 2. Grille de diagnostic DCE de l'état du phytoplancton des masses d'eau lagunaires : (a) seuils des métriques/paramètres et valeurs de référence ; (b) seuils des EQR.

(a)		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais	Référence
abondance (nb cell. / L (x10 ⁶))	picophytoplancton		20		50		100		500		15 3
	nanophytoplancton		4		10		20		100		
biomasse (chlorophylle <i>a</i> en µg/L)			5		7		10		20		3.33
(b)		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais	
EQR_A abondance	picophytoplancton		0.75		0.3		0.15		0.03		
	nanophytoplancton		0.75		0.3		0.15		0.03		
EQR_B biomasse			0.67		0.48		0.33		0.17		
EQR_{PHY}			0.71		0.39		0.24		0.10		

2.2.2 Indicateurs de confiance et mise en évidence de tendance et d'années particulières

L'étude réalisée en 2016 dans le cadre du projet OBSLAG (Derolez *et al.*, 2017) a permis de sélectionner des méthodes statistiques pour fournir des indicateurs de confiance (Soudant, 2008), un indicateur de tendance et un test permettant de repérer des années particulières (Gimard,

2016), adaptés aux suivis de l'état vis-à-vis de l'eutrophisation des lagunes méditerranéennes. Ces méthodes sont appliquées : *i*) aux P90 des 4 paramètres suivis pour l'état physico-chimique de l'eau et *ii*) à l'indicateur d'état du phytoplancton et aux métriques de biomasse et d'abondance le composant.

a) Indicateurs de confiance

Les indicateurs des éléments de qualité « eau » et « phytoplancton » n'étant pas fondés sur des moyennes mais sur des percentiles 90 des valeurs estivales, les **intervalles de confiance (IC)** ne peuvent pas être calculés avec les méthodes classiques. Les intervalles de confiance sont donc calculés avec la méthode statistique du bootstrap non paramétrique (Soudant, 2008 ; Annexe 6.2).

L'approche par bootstrap permet également de donner la probabilité pour l'indicateur d'appartenir à chacune des 5 classes de qualité DCE, ce qui permet une représentation plus détaillée de la dispersion des données et d'attribuer un **niveau de confiance**, exprimé en pourcentage, au diagnostic fourni.

b) Mise en évidence de tendances et d'années particulières

Les tendances interannuelles ont été identifiées au moyen des tests statistiques non paramétriques de Mann Kendall et de Kruskal-Wallis (voir détails en Annexe 6.3).

Le test de Mann Kendall permet d'identifier si **une tendance monotone, c'est-à-dire continûment croissante ou décroissante**, est présente au sein d'un jeu de donnée. Sur les tableaux récapitulant les résultats, la tendance (augmentation, diminution ou pas de tendance) est indiquée, avec le cas échéant **le niveau moyen annuel d'augmentation ou de diminution**. Il est important de noter que le test de Mann Kendall s'appuie sur les données passées et n'a pas de pouvoir prédictif. Par ailleurs, ce test n'est en mesure de détecter que des tendances monotones. Ainsi, il ne permet pas d'identifier de tendance en cas de rupture dans le jeu de données, par exemple plusieurs années de croissance suivies d'une décroissance ou inversement.

Le test de Kruskal-Wallis, complété par le test post-hoc de Dunn, permettent de **comparer les données des différentes années des périodes de diagnostic afin d'identifier celles pour lesquelles les valeurs des indicateurs ou métriques/paramètres sont significativement différentes des autres**. Les résultats sont fournis sous la forme de lettres attribuées à chaque année de la période de diagnostic. Si deux années possèdent une lettre différente, cela signifie que les valeurs de l'indicateur pour ces deux années sont significativement différentes.

2.3 Méthode suivie pour évaluer la robustesse des indicateurs

2.3.1 Changements de classe et tendances d'évolution

Une synthèse des tendances d'évolution monotones significatives mises en évidence par le test de Mann Kendall pour une période de diagnostic n (diagnostic effectué l'année n à partir des données acquises au cours des 6 années consécutives $n-5$ à n) et des changements de classe d'état pour la période suivante (diagnostic effectué l'année $n+1$) est réalisée afin de distinguer les cas discordants ou concordants (Tableau 3).

Tableau 3. Cas rencontrés lors de la comparaison des conclusions données par le test de Mann Kendall pour une période de diagnostic (lignes) et des observations de la période suivante (colonnes). Les cas discordants sont représentés par des cases orangées et les cas concordants par des cases vertes.

Observations de la période suivante Tendance identifiée pour une période (test de Mann Kendall)	Perte d'une classe de qualité par rapport à la période précédente	Même classe de qualité qu'en période précédente	Gain d'une classe de qualité par rapport à la période précédente
Tendance monotone à la dégradation	Concordant "vrai positif"	Discordant "faux positif"	Discordant "faux positif"
Pas de tendance monotone	Discordant "faux négatif"	Concordant "vrai négatif"	Discordant "faux négatif"
Tendance monotone à l'amélioration	Discordant "faux positif"	Discordant "faux positif"	Concordant "vrai positif"

Il est important de rappeler ici que le test de Mann Kendall est employé pour détecter des tendances passées mais n'a pas de pouvoir prédictif. Cependant, à titre exploratoire, une analyse de l'efficacité du test vis-à-vis des observations ultérieures est effectuée en s'appuyant sur les dénombrements des cas suivants (identifiés dans le Tableau 3) :

- « **Vrais positifs** » : le test conclut à la présence d'une tendance monotone sur les 6 années passées (période de diagnostic n) et les observations suivantes (période $n+1$) indiquent un changement de classe.
- « **Vrais négatifs** » : le test conclut à l'absence de tendance monotone sur les 6 années passées (période n) et les observations suivantes (période $n+1$) n'indiquent pas de changement de classe.
- « **Faux positifs** » : le test conclut : *i*) à la présence d'une tendance monotone sur les 6 années passées (période n) mais les observations suivantes (période $n+1$) n'indiquent pas de changement de classe ; *ii*) ou à la présence d'une tendance monotone suivie d'un changement de classe discordant (*i.e.* tendance décroissante suivie d'un gain de classe ou tendance croissante suivie d'une perte de classe).
- « **Faux négatifs** » : le test conclut à l'absence de tendance monotone sur les 6 années passées (période n) mais les observations suivantes (période $n+1$) indiquent un changement de classe.

La **sensibilité** correspond à la probabilité que le test détecte une tendance monotone concordante avec l'observation de la période suivante (*i.e.* changement de classe) et se calcule ainsi :

$$\text{sensibilité} = \frac{\text{vrais positifs}}{\text{vrais positifs} + \text{faux négatifs}}$$

La **spécificité** correspond à la probabilité que le test ne détecte pas de tendance monotone pour les cas de maintien de classe les périodes suivantes. Elle se calcule ainsi :

$$\text{spécificité} = \frac{\text{vrais négatifs}}{\text{vrais négatifs} + \text{faux positifs}}$$

Dans le domaine médical, un test est considéré performant s'il respecte un bon compromis entre sensibilité élevée (pour dépister le plus grand nombre de personnes suspectes) et spécificité élevée (pour réduire le nombre de faux positifs) et dépend de l'objectif recherché (Morin *et al.*, 1998). Dans le cas d'OBSLAG, une sensibilité élevée du test est intéressante car cela peut permettre de détecter précocement une dégradation ou une amélioration de l'état de la colonne d'eau ou du phytoplancton. Cependant, une spécificité basse qui serait due à beaucoup de « faux positifs » n'est pas forcément problématique car le test est mis en œuvre dans le cadre d'OBSLAG pour compléter et affiner les informations données par les classes d'état DCE, en particulier pour détecter des évolutions au sein d'une même classe de qualité au cours de la période de 6 années du diagnostic.

La sensibilité et la spécificité ont été estimées **pour les diagnostics de 2009 à 2021** pour l'état physico-chimique de l'eau et pour l'état du phytoplancton (70 couples d'années successives = (8-1) périodes * 10 masses d'eau pour chaque élément de qualité)⁶.

Nous avons ensuite choisi de réaliser une analyse plus détaillée des cas de « faux négatifs » pour lesquels le seuil entre les états « Bon » à « Moyen » est franchi, pour tenter de comprendre les causes de ces changements de classe non détectés par les tests de tendance. Ces cas peuvent en effet être problématiques pour les dégradations de l'état nécessitant la mise en œuvre d'actions de gestion visant à diminuer les pressions anthropiques.

2.3.2 Evolutions à long terme (périodes de diagnostic disjointes)

Pour les lagunes méditerranéennes, les diagnostics de l'état physico-chimique de l'eau et de l'état du phytoplancton sont obtenus à partir des données acquises au cours de 6 étés consécutifs (soit les années $n-5$ à n pour le diagnostic de l'année n , par exemple les années 2015 à 2020 pour le diagnostic 2020). Ainsi, le diagnostic de l'année $n+1$ s'appuie pour 5 années sur 6 (soit 83%) sur des données communes au diagnostic obtenu l'année n , avec un décalage d'une année uniquement (soit les années 2016 à 2021 pour le diagnostic 2021) : les données de l'année $n+1$ sont ajoutées (2021 dans notre exemple) et celles de l'année $n-5$ ne sont plus considérées (2015 dans notre exemple).

Afin de rendre compte de la sensibilité des indicateurs aux évolutions à plus long terme, la comparaison de périodes de diagnostic disjointes paraît donc pertinente. Nous effectuerons cette comparaison sur les périodes disjointes de 2010-2015 et 2016-2021 (correspondant aux périodes de diagnostic des 2 premiers Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux -

⁶ Les tendances de la dernière période 2016-2021 ne peuvent pas être considérées car les diagnostics de période suivante (2017-2022) ne sont pas disponibles. Les états de la 1^{ère} période 2009-2014 ne peuvent pas être considérées car les tendances de la période précédente (2008-2013) ne sont pas disponibles.

SDAGE), sur un exemple caractérisé par le franchissement de la limite du « bon état », conduisant à déclasser l'état écologique de la masse d'eau (inférieur au bon état) et nécessitant donc la mise en œuvre de mesures de gestion pour atteindre le bon état au titre de la DCE.

2.3.3 Potentiel communicatif des indicateurs de variabilité

L'intervalle de confiance à 95% et le niveau de confiance fournissent des informations complémentaires sur la dispersion des données et sur la confiance que l'on peut accorder au diagnostic fourni. Cependant, si l'information apportée par le niveau de confiance est assez explicite (probabilité en %, pour l'indicateur d'appartenir à chacune des 5 classes de qualité DCE), les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance sont moins faciles à interpréter. Nous testerons donc la possibilité de représenter l'étendue des intervalles de confiance, selon qu'elle soit faible ou élevée, au regard de la gamme de valeurs prises par chaque indicateur.

3 Résultats et discussion

3.1 Changements de classes et tendances d'évolution

3.1.1 Bilan de l'ensemble des diagnostics

Le bilan des états DCE des 8 périodes de diagnostics de 2009 à 2021 est présenté dans le Tableau 4 pour la physico-chimie de l'eau, et dans le Tableau 5 pour le phytoplancton. Les flèches sont ajoutées lorsqu'une tendance à l'amélioration ou à la dégradation a été détectée par le test de Mann Kendall pour au moins un des paramètres de l'indicateur physico-chimique ou un des indices/métriques du phytoplancton.

Tableau 4. Etat DCE donné par l'indicateur physico-chimique de l'eau pour 8 périodes de diagnostic de 2009 à 2021 (**en gras** les périodes des diagnostics OBSLAG), pour les 10 masses d'eau lagunaires OBSLAG-eutrophisation. Les flèches indiquent qu'une tendance à l'amélioration (↗) ou à la dégradation (↘) a été détectée pour au moins un des paramètres de l'indicateur physico-chimique.

Code de la masse d'eau	Nom de la masse d'eau	2009-2014	2010-2015	2011-2016	2012-2017	2013-2018	2014-2019	2015-2020	2016-2021
FRDT 01	Canet			↗					↗
FRDT 03	La Palme	↗	↗	↗		↘	↘	↘	↘
FRDT 04	Bages-Sigean			↘	↘				
FRDT 05	Ayrolle					↘	↘		
FRDT 10	Thau	↗		↗	↗	↘	↘	↘	
FRDT 11c	Palavasiens-Ouest	↘	↘						↘
FRDT 11b	Palavasiens-Est	↘				↗	↘	↗	
FRDT 11a	Or	↘					↘		↗
FRDT 15a	Berre	↗				↗			↘
FRET 01	Biguglia	↗	↘	↘	↘	↘	↘		

Parmi les 70 couples de diagnostics de l'état de l'eau de 2009 à 2021, on dénombre :

- **6 changements de classe de qualité d'un diagnostic au suivant :**
 - 3 pertes d'une classe de qualité,
 - 3 gains d'une classe de qualité ;
- **33 diagnostics pour lesquels une tendance significative est mise en évidence :**
 - 21 tendances à la dégradation,
 - 12 tendances à l'amélioration,
 - *NB : parmi ces 33 cas, 4 correspondent à des tendances à la dégradation pour des états « Mauvais » et les 3 à des tendances à l'amélioration pour des états « Très bons ». Ces cas ne peuvent donc pas faire l'objet de changement de classe de qualité l'année suivante et sont exclus des dénombrements.*

Tableau 5. Etat DCE donné par l'indicateur du phytoplancton pour les 8 périodes de 6 ans de diagnostic de 2009 à 2021 (**en gras** les périodes des diagnostics OBSLAG), pour les 10 masses d'eau lagunaires OBSLAG-eutrophisation. Les flèches indiquent qu'une tendance à l'amélioration (↗) ou à la dégradation (↘) a été détectée pour au moins un des indices ou métriques de l'indicateur du phytoplancton.

Code de la masse d'eau	Nom de la masse d'eau	2009-2014	2010-2015	2011-2016	2012-2017	2013-2018	2014-2019	2015-2020	2016-2021
FRDT 01	Canet		↗						
FRDT 03	La Palme	↗	↗	↗			↘	↘	
FRDT 04	Bages-Sigean			↘	↘	↘	↘		
FRDT 05	Ayrolle						↗		
FRDT 10	Thau	↗	↗						
FRDT 11c	Palavasiens-Ouest	↘					↗		
FRDT 11b	Palavasiens-Est	↘			↘				
FRDT 11a	Or	↘	↗						↗
FRDT 15a	Berre								
FRET 01	Biguglia	↗			↗	↗			

Parmi les 70 couples de diagnostics de l'état du phytoplancton de 2009 à 2021, on dénombre :

- **10 changements de classe de qualité d'un diagnostic au suivant :**
 - 2 pertes d'une classe de qualité,
 - 8 gains d'une classe de qualité ;
- **22 diagnostics pour lesquels une tendance significative est mise en évidence :**
 - 10 tendances à la dégradation,
 - 12 tendances à l'amélioration,
 - *NB : parmi ces 22 cas, 2 correspondent à des tendances à la dégradation pour des états « Mauvais » et les 3 à des tendances à l'amélioration pour des états « Très bons ». Ces cas ne peuvent donc pas faire l'objet de changement de classe de qualité l'année suivante et sont exclus des dénombrements.*

L'analyse exploratoire de la sensibilité et de la spécificité des tests a été effectuée pour les deux éléments de qualité « physico-chimie de l'eau » et « phytoplancton » à partir des dénombrements des cas de vrais/faux positifs et négatifs disponibles en Annexe 6.4. **Pour l'élément de qualité « physico-chimie de l'eau », la sensibilité est évaluée à 60% et la spécificité à 60,3%. Pour l'élément de qualité « phytoplancton », la sensibilité est évaluée à 30% et la spécificité à 74,5%.**

Pour les deux éléments de qualité, on observe donc une **relativement bonne spécificité du test**, c'est-à-dire sa capacité à indiquer l'absence de tendance alors que la classe de qualité est maintenue la période suivante. Plusieurs causes peuvent expliquer une spécificité modérée :

- des tendances significatives peuvent être détectées pour des valeurs trop éloignées du seuil de la classe de qualité occupée en période n pour engendrer un changement de classe la période suivante ($n+1$) ;
- dans notre analyse, les tendances ont été considérées significatives à l'échelle de chaque élément de qualité dès lors qu'un des paramètres de l'indicateur physico-chimie de l'eau ou un des métriques/paramètres du phytoplancton présentait un test de Mann Kendall significatif. Cela conduit naturellement à augmenter le nombre de « faux positifs » car la dégradation ou amélioration d'une des composantes des indicateurs ne se répercute pas systématiquement sur l'indicateur.

La **sensibilité**, qui correspond à la probabilité que le test détecte une tendance monotone concordante avec l'observation de la période suivante (*i.e.* changement de classe), est **relativement bonne pour la physico-chimie de l'eau mais faible pour le phytoplancton**. Plusieurs raisons peuvent conduire à ce constat :

- le test de Mann Kendall détecte des tendances monotones, c'est-à-dire continûment croissantes ou décroissantes. Or, certains changements de classe peuvent résulter de dégradations ponctuelles (ex. apparition de pics en fin de la période de diagnostic) ou d'améliorations ponctuelles (ex. suppression de pics situés en début de période, lors de l'ajout d'une année de diagnostic) ;
- l'indicateur de la physico-chimie de l'eau fonctionne sur le système « *one-out all-out* », avec un seul des 4 paramètres déclassant engendrant le déclassement de l'indicateur. Ainsi, une dégradation d'un seul des paramètres peut conduire à une perte ou un gain de classe l'année suivante, ce qui peut expliquer la meilleure sensibilité observée pour la physico-chimie de l'eau ;
- en revanche, l'indicateur du phytoplancton s'appuie sur l'EQR minimum pour les abondances de pico- et de nano-phytoplancton, puis sur la moyenne des EQR d'abondance et de biomasse. Ces intégrations successives des métriques/paramètres peuvent favoriser des changements de classe lorsque plusieurs métriques/paramètres sont en limite de classe ou caractérisés par des tendances en limite de significativité (non détectées par les tests de Mann Kendall).

3.1.2 Passages du seuil « Bon-Moyen »

Parmi les « faux positifs », un seul cas correspond au déclassement de l'état « Bon » à l'état « Moyen », associé à une tendance à l'amélioration la période précédente (physico-chimie de l'eau de La Palme pour 2012-2017). Parmi les « faux négatifs » on dénombre deux cas pour lesquels le seuil entre les états « Bon » à « Moyen » a été franchi, sans qu'une tendance monotone n'ait été détectée la période précédente. Ces deux cas concernent le gain d'une classe de qualité du phytoplancton pour Berre (entre les périodes 2014-2019 et 2015-2020) et les Palavasiens-Ouest (entre les périodes 2015-2020 et 2016-2021). Ces trois cas sont détaillés ci-après.

a) Dégradation de l'élément de qualité « physico-chimie de l'eau » : La Palme (2012-2017)

L'élément de qualité « physico-chimie de l'eau » de la lagune de La Palme est en état « Bon » pour la période 2011-2016, mais en état « Moyen » pour la période suivante 2012-2017. L'évolution des 4 paramètres constituant l'indicateur au cours de ces 2 périodes successives est représentée en Figure 4.

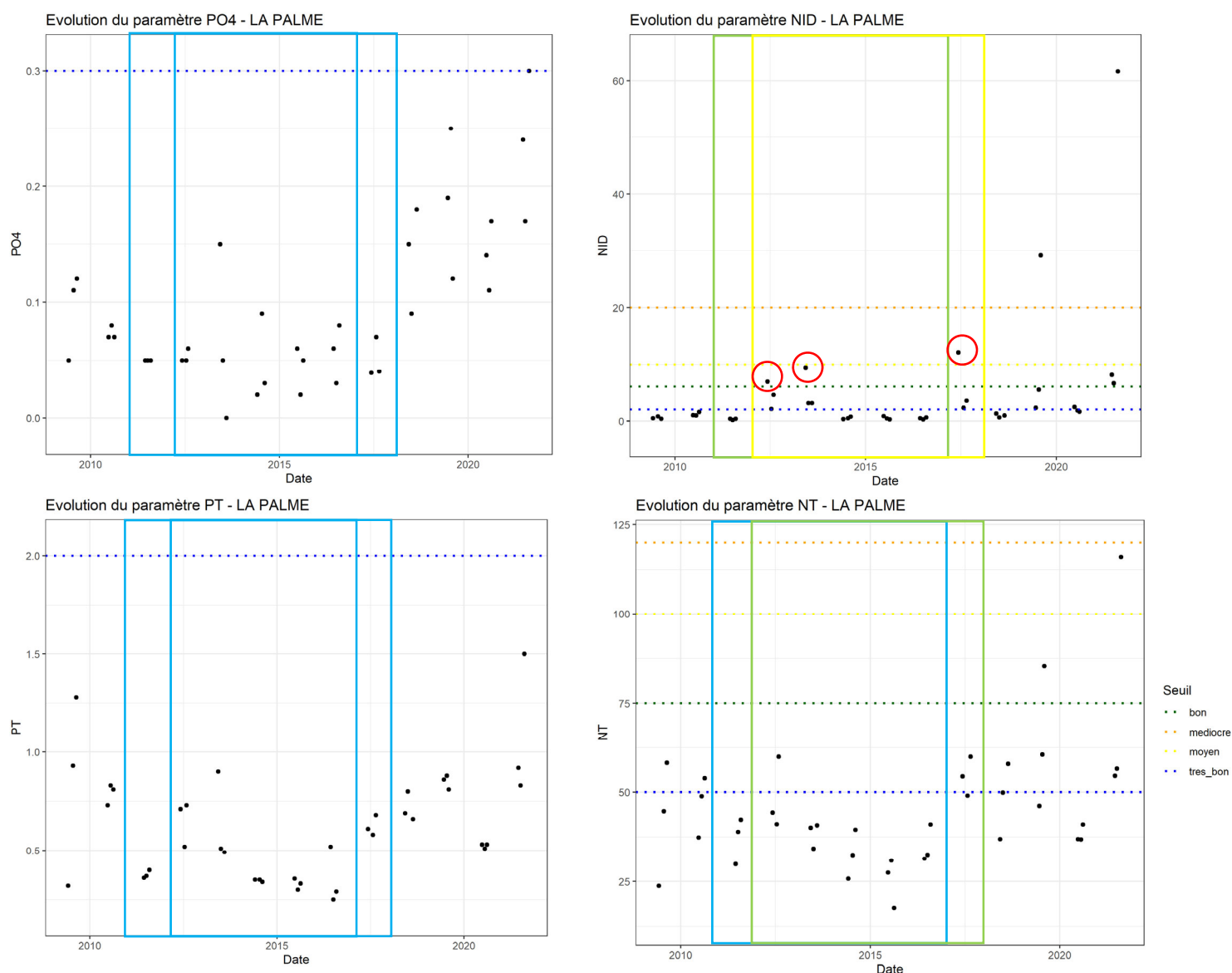


Figure 4. Evolution des paramètres PO4, NID, PT et NT constituant l'indicateur de la physico-chimie de l'eau de 2009 à 2021 à La Palme. Les encadrés indiquent l'état de chaque paramètre pour les diagnostics des périodes 2011-2016 et 2012-2017. Les points encerclés en 2012, 2013 et 2017 correspondent aux pics de NID des années identifiées par le test de Kruskal-Wallis pour la période 2012-2017. NB : les seuils figurent la limite supérieure des classes de qualité DCE et sont donnés à titre indicatifs car ils s'appliquent non pas aux valeurs ponctuelles mais au P90 calculé sur 6 années consécutives.

La Figure 4 illustre que le NID est à l'origine de la dégradation de l'état de la colonne d'eau⁷, avec un pic dans la gamme de l'état « Médiocre » en 2017. Ce pic s'ajoute aux deux valeurs élevées de NID observées en 2012 et 2013 (situées dans la gamme de l'état « Moyen »), mises en évidence

⁷ Les pics de NID sont associés à des concentrations élevées en NH_4 , probablement liées à des dysfonctionnements de la STEU de La Palme (cf rapports OBSLAG 2020 et 2022).

par le test de Kruskal-Wallis (Tableau 6), et fait donc basculer l'état du paramètre NID et donc de la colonne d'eau dans la classe « Moyenne » en période 2012-2017, sans tendance monotone à la hausse détectée lors de la période précédente (2011-2016). Cet exemple correspond donc à un déclassement engendré par des pics ponctuels et non par une tendance monotone à l'augmentation des concentrations.

Le Tableau 6 illustre l'étendue importante des valeurs de NID et le changement de leur répartition entre les classes de qualité d'une période à l'autre, avec :

- pour la période **2011-2016** : **63% de confiance associée au bon état** et 33% à l'état moyen,
- pour la période **2012-2017** : 32% de confiance associée au bon état et **62% à l'état moyen**,
- pour les deux périodes : des intervalles de confiance prenant des valeurs sur trois classes de qualité (des états « Très bon » à « Moyen » pour 2011-2016 et « Bon » à « Médiocre » pour 2012-2017).

Le Tableau 6 indique par ailleurs que la tendance à l'amélioration a été détectée en période 2011-2016 pour le paramètre PT, dont l'état est dans la classe « Très Bon » et ne peut pas aller au-delà.

Tableau 6. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état physico-chimique de la colonne d'eau pour les périodes 2011-2016 et 2012-2017 à La Palme.

Paramètre	P90 (µM)	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Mann Kendall)
Période 2011-2016					
Etat physico-chimique « bon »					
PO4	0.1	[0.1;0.2]	<u>100</u> -0-0-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
NID	5	[1.3;9.5]	4- <u>63</u> - <u>33</u> -0-0	Valeurs de 2012 et 2013 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance
PT	0.7	[0.5;0.9]	<u>100</u> -0-0-0-0	Valeurs de 2012 et 2013 supérieures à celles de 2014, 2015 et 2016	Tendance à la diminution (-0.03 µM par an)
NT	42.7	[40.8;59.9]	<u>93</u> -7-0-0-0	Valeurs de 2012 supérieures à celles de 2014, 2015 et 2016	Pas de tendance
Période 2012-2017					
Etat physico-chimique « moyen »					
PO4	0.1	[0.1;0.2]	<u>100</u> -0-0-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
NID	7.4	[3.1;12.1]	0-32- <u>62</u> -6-0	Valeurs de 2012, 2013 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance
PT	0.7	[0.6;0.9]	<u>100</u> -0-0-0-0	Valeurs de 2012, 2013 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance
NT	55.5	[41.1;60]	<u>23</u> - <u>77</u> -0-0-0	Valeurs de 2012 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance

Points de vigilance sur les indicateurs : Tendance : déclassement engendré par des pics ponctuels de NID et non par une augmentation monotone des concentrations. **Confiance** : seulement 63% de confiance associée au bon état du NID et intervalle de confiance prenant des valeurs sur 3 classes de qualité (« Très bon » à « Moyen ») pour la période 2011-2016.

b) Amélioration de l'élément de qualité « phytoplancton » : Berre (2015-2020)

L'élément de qualité « phytoplancton » de la lagune de Berre est diagnostiqué en état « Moyen » pour la période 2014-2019, puis en état « Bon » pour la période suivante 2015-2020. L'évolution de l'abondance du nano-phytoplancton au cours de ces deux périodes successives (Figure 5) illustre que le décalage d'une année, induisant en particulier la suppression du pic de l'été 2014 (dans la gamme de l'état « Moyen »), est à l'origine de l'amélioration de l'état du phytoplancton pour la période suivante (toutes les valeurs dans la gamme du très bon état en 2020). Cependant, le test de Mann Kendall ne détecte pas de tendance monotone à la baisse lors de la période 2014-2019. Cet exemple correspond donc à une amélioration due au changement dans la distribution des données constituant le P90 de l'indicateur (Tableau 7), et non à une tendance monotone à la diminution des concentrations.

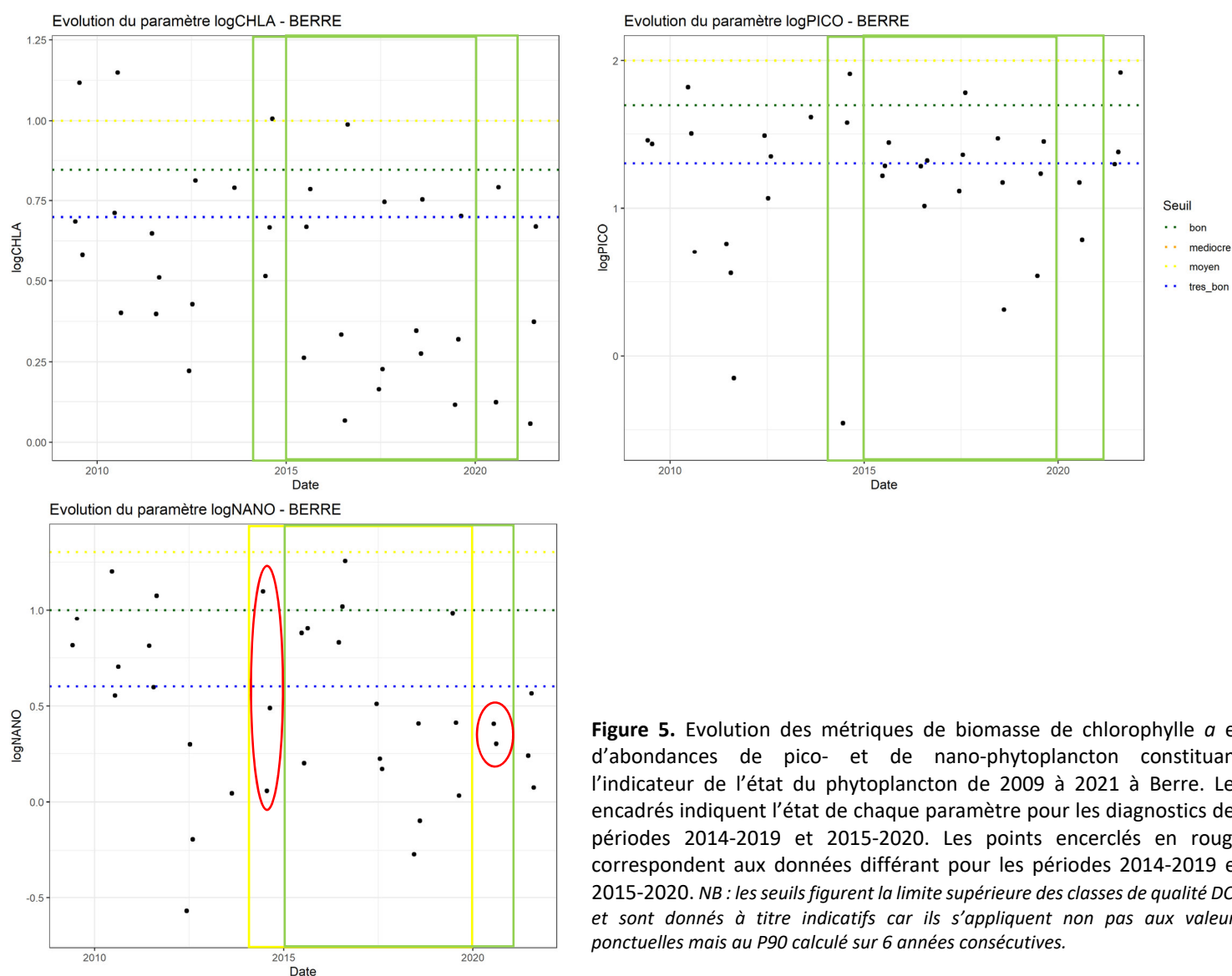


Figure 5. Evolution des métriques de biomasse de chlorophylle *a* et d'abondances de pico- et de nano-phytoplancton constituant l'indicateur de l'état du phytoplancton de 2009 à 2021 à Berre. Les encadrés indiquent l'état de chaque paramètre pour les diagnostics des périodes 2014-2019 et 2015-2020. Les points encerclés en rouge correspondent aux données différant pour les périodes 2014-2019 et 2015-2020. NB : les seuils figurent la limite supérieure des classes de qualité DCE et sont donnés à titre indicatifs car ils s'appliquent non pas aux valeurs ponctuelles mais au P90 calculé sur 6 années consécutives.

Par ailleurs, les niveaux de confiance (Tableau 7) traduisent le fait que les données sont réparties entre les états « Bon » et « Moyen » avec un changement de répartition entre les classes de qualité d'une période à l'autre :

- pour la période **2014-2019** : 44% de confiance associée au bon état et **56% à l'état moyen**,
- pour la période **2015-2020** : **75% de confiance associée au bon état** et 25% à l'état moyen.

De plus, les **EQR d'abondance du nano-phytoplancton (0,28 en période 2014-2019 et 0,3 en période 2015-2020)** se situent, à deux centièmes près, en limite supérieure de la classe d'état « **Moyen** » (0,3), ce qui amplifie l'impact de la suppression de pics due au décalage de la fenêtre temporelle de diagnostic.

Tableau 7. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état du phytoplancton pour les périodes 2014-2019 et 2015-2020 à Berre.

Indicateur	P90	EQR	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Mann Kendall)
Période 2014-2019						
Etat du phytoplancton « moyen »						
Métrique de biomasse	6.8 µg/L	0.49	[0.33;0.59]	0-70-23-7-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	42.7 10 ⁶ cell/L	0.35	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	10.9 10 ⁶ cell/L	0.28	-	-	Valeurs de 2016 supérieures à celles de 2018	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.28	[0.17;0.38]	0-24-76-0-0		
Indicateur phytoplancton		0.38	[0.26;0.47]	0-44-56-0-0		
Période 2015-2020						
Etat du phytoplancton « bon »						
Métrique de biomasse	6.1 µg/L	0.55	[0.34;0.59]	0-77-23-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	28.5 10 ⁶ cell/L	0.53	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	9.9 10 ⁶ cell/L	0.3	-	-	Valeurs de 2016 supérieures à celles de 2017 et 2018	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.3	[0.17;0.43]	0-55-45-0-0		
Indicateur phytoplancton		0.42	[0.31;0.5]	0-75-25-0-0		

NB : les bootstraps n'ont été appliqués qu'au niveau des EQR (biomasse, abondance et indicateur phytoplancton) et pas au niveau des abondances du nano- et du pico-phytoplancton, ce qui explique l'absence des intervalles et indices de confiance pour ces paramètres.

Points de vigilance sur les indicateurs : Tendance : amélioration due à la suppression de pics de nanophytoplancton et non à une diminution monotone des abondances. **Confiance** : seulement 56% confiance associée à l'état moyen en période 2014-2019 ; EQR du nanophytoplancton situé à deux centièmes près du seuil de la classe « Moyen » pour 2014-2018 (EQR=0,28 et seuil à 0,3).

c) Amélioration de l'élément de qualité « phytoplancton » : Palavasiens-Ouest (2016-2021)

L'élément de qualité « phytoplancton » de la masse d'eau Palavasiens-Ouest est diagnostiqué en état « Moyen » pour la période 2015-2020, puis en état « Bon » pour la période suivante 2016-2021. L'évolution de l'abondance du pico-phytoplancton au cours de ces deux périodes successives (Figure 6) illustre que le décalage d'une année pour la seconde période de diagnostic retire le pic de l'été 2015 (valeur dans la gamme de l'état « Médiocre »). Ainsi, les valeurs de pico-phytoplancton de la seconde période ne sont plus pénalisées que par un seul pic (été 2019), ce qui permet de faire basculer le diagnostic dans la gamme du « Bon état ». Cependant, le test de Mann Kendall ne détecte pas de tendance monotone à la baisse lors de la période 2015-2020. Comme dans l'exemple précédent (§ 3.1.2.a.), ce cas correspond à une amélioration due au changement dans la distribution des données constituant le P90 de l'indicateur (Tableau 8), et non à une tendance monotone à la diminution des concentrations.

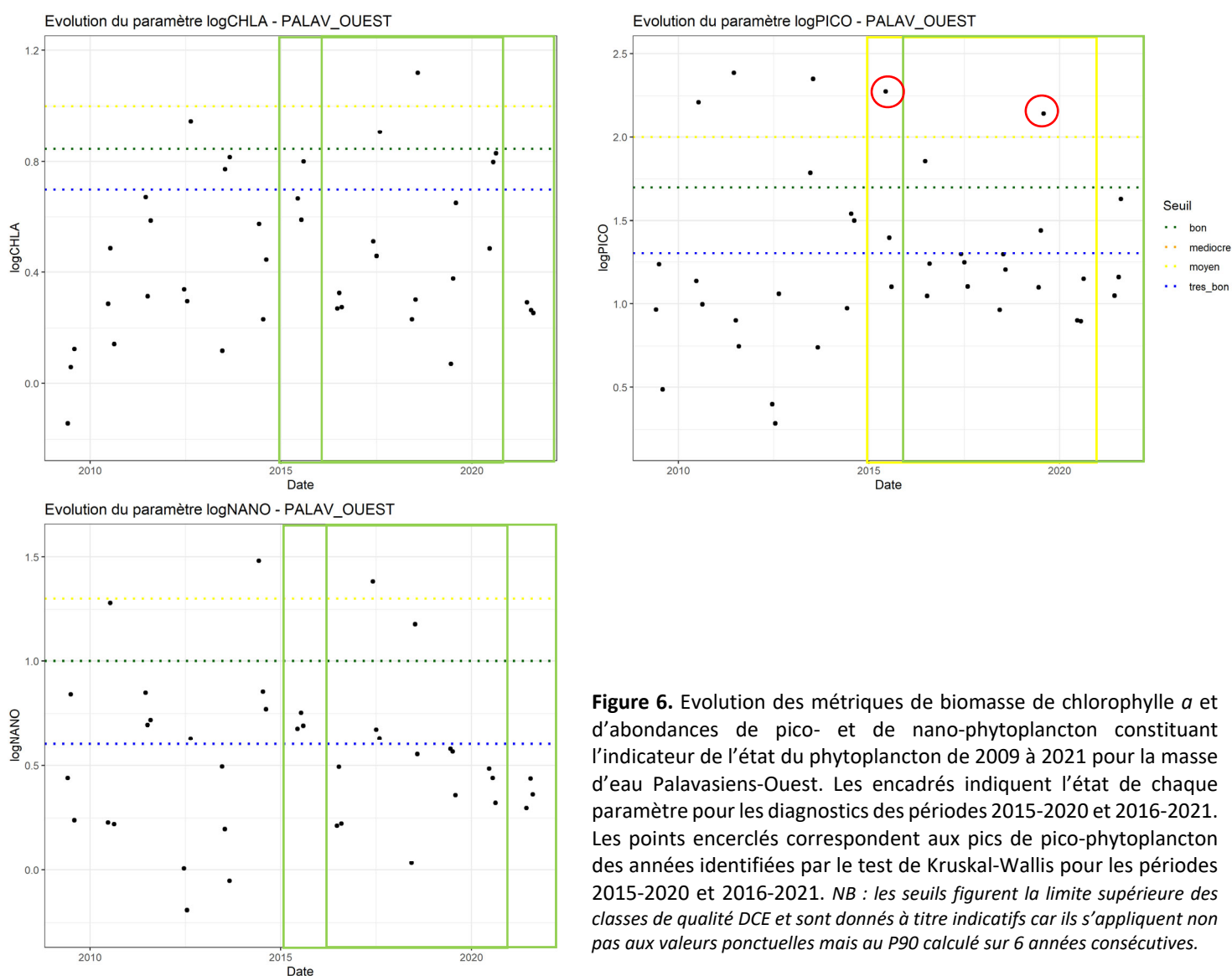


Figure 6. Evolution des métriques de biomasse de chlorophylle a et d'abondances de pico- et de nano-phytoplancton constituant l'indicateur de l'état du phytoplancton de 2009 à 2021 pour la masse d'eau Palavasiens-Ouest. Les encadrés indiquent l'état de chaque paramètre pour les diagnostics des périodes 2015-2020 et 2016-2021. Les points encadrés correspondent aux pics de pico-phytoplancton des années identifiées par le test de Kruskal-Wallis pour les périodes 2015-2020 et 2016-2021. NB : les seuils figurent la limite supérieure des classes de qualité DCE et sont donnés à titre indicatifs car ils s'appliquent non pas aux valeurs ponctuelles mais au P90 calculé sur 6 années consécutives.

Par ailleurs, les intervalles et indices de confiance (Tableau 8) traduisent bien l'étendue importante de la métrique d'abondance du phytoplancton et le changement de leur répartition entre les classes de qualité d'une période à l'autre :

- pour la période **2015-2020** : 26% de confiance associée au bon état, **39% à l'état moyen** et **36% à l'état médiocre**,
- pour la période **2016-2021** : **43% de confiance associée au bon état**, **44% à l'état moyen** et 12% à l'état médiocre,
- pour les deux périodes : des intervalles de confiance prenant des valeurs sur trois classes de qualité (des états « Bon » à « Médiocre »).

Enfin, il faut noter que l'EQR d'abondance du pico-phytoplancton, qui décline la métrique d'abondance en période 2015-2020 (EQR=0,18), franchit le seuil séparant les états « Moyen » et « Bon » en seconde période, seulement à un centième près (EQR=0,31 pour un seuil fixé à 0,30).

Tableau 8. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état du phytoplancton pour les périodes 2015-2020 et 2016-2021 sur les Palavasiens-Ouest.

Indicateur	P90	EQR	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Man Kendall)
Période 2015-2020						
Etat du phytoplancton « moyen »						
Métrique de biomasse	7 µg/L	0.48	[0.25;0.67]	2-41-52-5-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	85.3 10 ⁶ cell/L	0.18	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	7.5 10 ⁶ cell/L	0.4	-	-	Valeurs de 2015 et 2017 supérieures à celles de 2016 et 2020	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.18	[0.08;0.59]	0-26-39-36-0		
Indicateur phytoplancton		0.33	[0.19;0.54]	0-25-68-7-0		
Période 2016-2021						
Etat du phytoplancton « bon »						
Métrique de biomasse	7 µg/L	0.48	[0.25;0.95]	14-29-51-6-0	Valeurs de 2017 et 2020 supérieures à celles de 2021	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	48.4 10 ⁶ cell/L	0.31	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	6.8 10 ⁶ cell/L	0.44	-	-	Valeurs de 2017 supérieures à celles de 2016, 2020 et 2021	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.31	[0.11;0.68]	1-43-44-12-0		
Indicateur phytoplancton		0.39	[0.22;0.61]	1-44-51-4-0		

NB : les bootstraps n'ont été appliqués qu'au niveau des EQR (biomasse, abondance et indicateur phytoplancton) et pas au niveau des abondances du nano- et du pico-phytoplancton, ce qui explique l'absence des intervalles et indices de confiance pour ces paramètres.

Points de vigilance sur les indicateurs : Tendance : amélioration due à la suppression de pics de picophytoplancton et non à une diminution monotone des abondances. **Confiance** : seulement 39% confiance associée à l'état moyen en période 2015-2020 et 43% à l'état bon en période 2016-2021 ; intervalle de confiance prenant des valeurs sur 3 classes de qualité (« Bon » à « Médiocre ») pour les deux périodes ; EQR du picophytoplancton situé à un centième près du seuil de la classe « Moyen » pour 2016-2021 (EQR=0,31 et seuil à 0,3).

3.2 Evolution à long terme (périodes de diagnostic disjointes)

La Figure 7 illustre l'évolution des paramètres et métriques de l'élément de qualité « physico-chimie de l'eau » de 2009 à 2021, pour un exemple de déclassement avec franchissement du seuil du bon état : la lagune de La Palme. Les encadrés indiquent l'état au regard des grilles de diagnostic DCE pour les 2 périodes disjointes de 2010-2015 et 2016-2021.

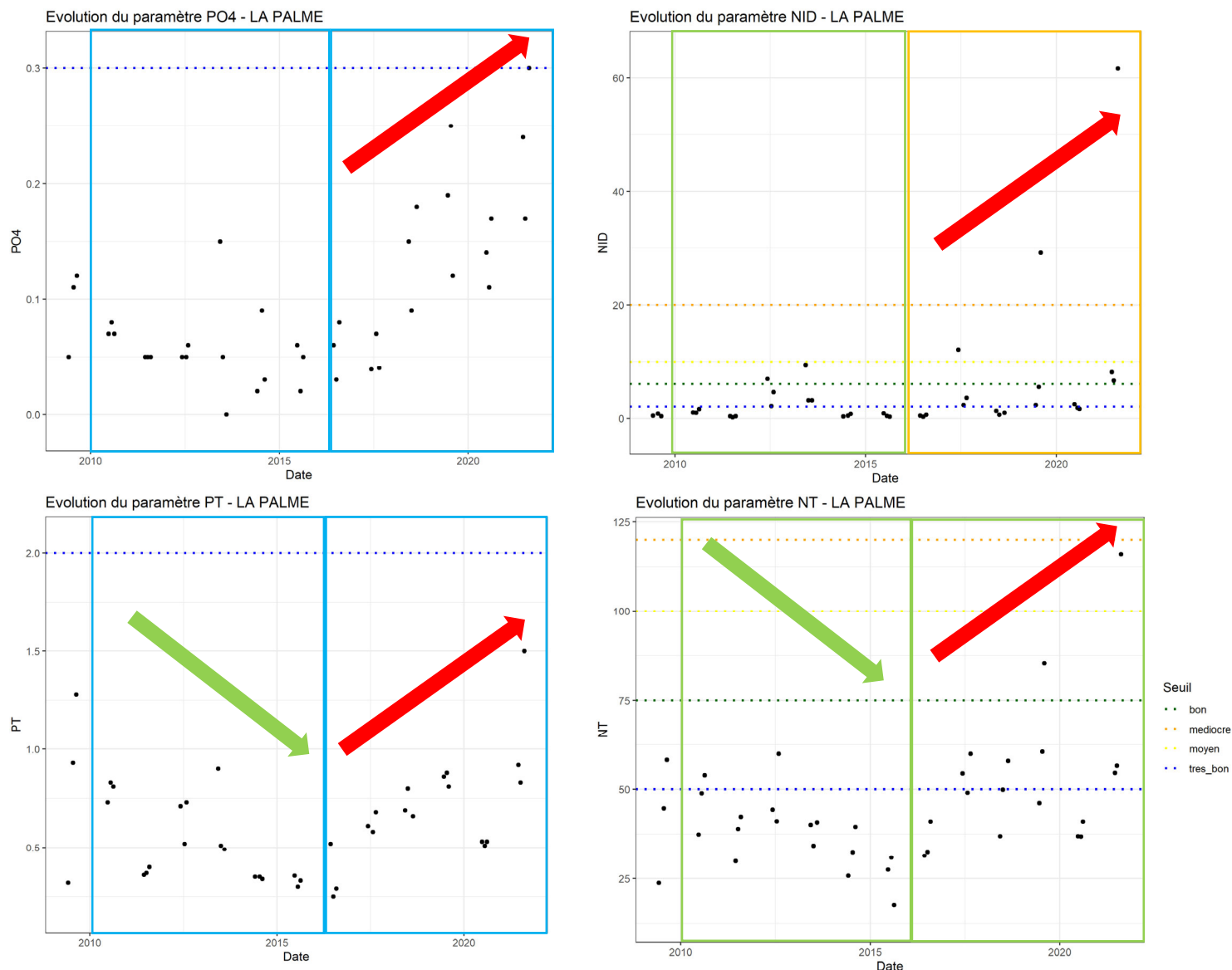


Figure 7. Evolution des paramètres PO4, NID, PT et NT constituant l'indicateur de la physico-chimie de l'eau de 2009 à 2021 à La Palme. Les encadrés indiquent l'état de chaque paramètre pour les diagnostics des périodes disjointes 2010-2015 et 2016-2021. Les flèches indiquent une tendance significative (test de Mann Kendall) au cours de chacune des deux périodes (flèches rouges pour l'augmentation et vertes pour la diminution). NB : les seuils figurent la limite supérieure des classes de qualité DCE et sont donnés à titre indicatifs car ils s'appliquent non pas aux valeurs ponctuelles mais au P90 calculé sur 6 années consécutives.

Sur La Palme, le passage d'un état « Bon » à un état « Médiocre » de la colonne d'eau est dû à la concentration en NID, pour laquelle une tendance à la hausse est détectée par le test de Mann Kendall en période 2016-2021 (Figure 7). Cette hausse se répercute sur la concentration en NT, qui augmente également de façon significative. Les paramètres phosphatés (PO4 et PT), bien que prenant des valeurs dans la classe de qualité « Très bonne », sont également caractérisés par une

hausse significative en dernière période. Ces tendances à la hausse concordantes pour les 4 paramètres, témoignent bien de la dégradation de la colonne d'eau vis-à-vis de l'eutrophisation, avec une inflexion de la trajectoire autour de l'été 2015. Cette dégradation avait ainsi été identifiée par tests de tendance dès la période 2013-2018 et confirmée les périodes suivantes (Tableau 4). Les pics de NID observés sur La Palme en 2017 et 2019 sont dus à des concentrations élevées en ammonium et peuvent être issus de dysfonctionnements de la station d'épuration des eaux usées (STEU) de la Palme (Benau, 2020). En outre, des travaux récents (Andrisoa *et al.*, 2019) montrent qu'en fonctionnement normal de la STEU, la production de macrophytes sur cette lagune oligotrophe peu profonde est majoritairement soutenue par les flux d'azote à l'interface eau-sédiment (sources karstiques et recirculation des eaux interstitielles). Ainsi, des conditions hydro-climatiques particulières (grau fermé et sécheresse printanière entraînant des salinités élevées dès le printemps) pourraient déstabiliser le compartiment « Macrophytes » et réduire ainsi la capacité de ce compartiment à piéger les flux d'azote inorganique à l'interface eau-sédiment (Derolez *et al.*, 2021).

3.3 Potentiel communicatif des indicateurs de variabilité

Afin de qualifier l'étendue des intervalles de confiance (IC), selon qu'elle soit faible ou élevée au regard de la gamme de valeurs prises par chaque indicateur, nous nous appuyons sur le premier exemple présenté dans le § 3.1.2.a (les deux autres exemples figurent en Annexe 6.5). Un dégradé de couleurs grisées, du plus clair pour une classe de qualité, au plus intense pour 5 classes de qualité couvertes par l'IC, est ainsi appliqué sur la colonne correspondante du Tableau 9.

Tableau 9. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état physico-chimique de la colonne d'eau pour les périodes 2011-2016 et 2012-2017 à La Palme. Les cases de la colonne relative à l'IC sont colorées selon le gradient ci-dessous :

Paramètre	P90 (µM)	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Man Kendall)	Nombre de classes de qualité couvertes par l'IC :
Période 2011-2016						
Etat physico-chimique « bon »						
PO4	0.1	[0.1;0.2]	100-0-0-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance	
NID	5	[1.3;9.5]	4-63-33-0-0	Valeurs de 2012 et 2013 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance	
PT	0.7	[0.5;0.9]	100-0-0-0-0	Valeurs de 2012 et 2013 supérieures à celles de 2014, 2015 et 2016	Tendance à la diminution (-0.03 µM par an)	
NT	42.7	[40.8;59.9]	93-7-0-0-0	Valeurs de 2012 supérieures à celles de 2014, 2015 et 2016	Pas de tendance	
Période 2012-2017						
Etat physico-chimique « moyen »						
PO4	0.1	[0.1;0.2]	100-0-0-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance	
NID	7.4	[3.1;12.1]	0-32-62-6-0	Valeurs de 2012, 2013 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance	
PT	0.7	[0.6;0.9]	100-0-0-0-0	Valeurs de 2012, 2013 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance	
NT	55.5	[41.1;60]	23-77-0-0-0	Valeurs de 2012 et 2017 supérieures à celles des autres années	Pas de tendance	

La qualification de l'étendue des IC par ce code couleur enrichit l'information fournie par cet indicateur et les pourcentages de confiance. Ainsi, un IC étendu sera rendu davantage visible et amènera le lecteur à rechercher les informations sur les pourcentages par classe pour préciser le niveau de confiance qui peut être attribué à la classe de qualité de chaque métrique et indicateur. Cependant, afin de simplifier la compréhension des informations contenues dans les rapports OBSLAG, il paraît préférable de n'afficher dans les fiches par masse d'eau que les pourcentages de confiance, dont l'interprétation est plus directe, et de renvoyer en annexe les intervalles de confiance associés à la gradation de couleurs.

4 Conclusions et perspectives

Les analyses effectuées sur les indicateurs déployés de 2009 à 2021 dans le cadre du volet eutrophisation de l'observatoire OBSLAG confirment l'intérêt des tests de tendance. Ces derniers permettent en effet d'identifier les évolutions au sein d'une même période de diagnostic (6 étés consécutifs) et d'apporter des informations complémentaires aux classes d'état pour les éléments de qualité « physico-chimie de l'eau » et « phytoplancton ». Les tests de tendance utilisés n'ont pas de pouvoir prédictif et sont employés pour détecter des tendances passées. Nous avons cependant analysé leur concordance vis-à-vis des observations des périodes suivantes. Nos résultats montrent que les tests ont une relativement bonne spécificité pour les deux éléments de qualité et une sensibilité relativement bonne pour l'eau, mais faible pour le phytoplancton. Ainsi, les tests de tendance peuvent détecter des tendances monotones concordant avec des changements de classe les périodes suivantes, mais des discordances peuvent en revanche être observées pour des changements de classe dus : *i)* à des dégradations ou améliorations résultant d'évolutions non monotones ou de valeurs extrêmes ponctuelles, *ii)* ou à des indicateurs situés en limite de classes faisant basculer d'un état à l'autre du fait du décalage de la période de diagnostic. Ces changements ponctuels peuvent être détectés par les tests de Kruskal-Wallis, également déployés dans le cadre d'OBSLAG pour identifier les années pour lesquelles les valeurs des indicateurs ou métriques sont significativement différentes des autres. De plus, les intervalles et les indices de confiance qui indiquent la variabilité et l'étendue des valeurs prises par les métriques sont utiles pour mieux comprendre les évolutions et changements de classe éventuels. Ces dernières informations mériteraient d'être davantage valorisées dans les commentaires des fiches par masse d'eau des rapports OBSLAG, afin d'apporter encore plus de finesse aux diagnostics et d'alerter les gestionnaires sur des phénomènes de dégradation ponctuelle. Ainsi, il est proposé d'ajouter dans les fiches OBSLAG, le cas échéant, un encadré listant les « points de vigilance » soulevés par les indicateurs de tendance et de confiance, afin de mieux mettre en lumière les informations complémentaires qu'ils apportent sur l'évolution des éléments de qualité « physico-chimie de l'eau » et « phytoplancton ».

Les diagnostics DCE des éléments de qualité « physico-chimie de l'eau » et « phytoplancton » des lagunes méditerranéennes sont effectués à partir des données acquises au cours de 6 étés consécutifs, afin de répondre au besoin d'évaluation des SDAGE par plan de gestion de 6 ans. Les rapports OBSLAG sont fournis à fréquence bisannuelle et complètent les informations entre chaque diagnostic DCE. En complément de ces diagnostics, il paraîtrait pertinent de produire régulièrement des traitements des données à échelle temporelle plus grande afin de rendre compte de l'évolution et des tendances à plus long terme. En effet, les phénomènes biologiques se déroulent souvent sur des temps plus lents que les 6 années des périodes DCE, qui peuvent masquer la succession d'événements passés. De plus, les diagnostics des masses d'eau lagunaires s'appuient sur des prélèvements effectués mensuellement l'été, période la plus critique vis-à-vis de l'eutrophisation. Cela limite mécaniquement le nombre de données intervenant dans le calcul des indicateurs (3 données par année, soit 18 données par plan de gestion de 6 ans) et donc potentiellement leur sensibilité.

La qualification de l'étendue des intervalles de confiance avec un code couleur permet de rendre davantage visuelle l'information fournie par cet indicateur. Cependant, afin de concilier la quantité et la précision des informations contenues dans les fiches OBSLAG, cet indicateur, moins facilement interprétable que les pourcentages de confiance, sera basculé en annexe afin de conserver un discours suffisamment simple pour les utilisateurs et efficace pour orienter les décisions de gestion (Brun et Soudant, 2015).

Plusieurs perspectives complémentaires se dégagent de ce travail :

- *a minima* un suivi mensuel estival chaque année paraît nécessaire pour suivre l'évolution de l'état hydrologique et trophique pour l'ensemble des lagunes. Une piste pour augmenter la sensibilité des indicateurs serait d'augmenter la fréquence des suivis en passant à un échantillonnage estival bi-mensuel. L'échantillonnage pourrait même être étendu aux autres saisons, ce qui semble particulièrement pertinent dans le contexte de changement climatique qui peut bouleverser la saisonnalité des écosystèmes ;
- l'ajout d'une métrique de composition à l'indicateur « phytoplancton » pourrait également affiner le diagnostic de ce compartiment particulièrement sensible aux changements hydrologiques. Les données pigmentaires, qui peuvent fournir une information sur les communautés phytoplanctoniques du point de vue fonctionnel sont une piste à explorer ;
- enfin, il serait intéressant de davantage confronter les résultats des indicateurs aux pressions subies par les lagunes (pressions de pollution anthropique mais également fluctuations météorologiques et hydrologiques). Ainsi, les données des paramètres hydrologiques (température, salinité, turbidité et oxygène dissous) pourraient être ajoutées en annexe des rapports OBSLAG. Les données de débits et flux des principaux cours d'eau tributaires seraient des informations très utiles à mobiliser, mais elles ne sont pas encore disponibles pour une valorisation et une interprétation directe dans le cadre d'OBSLAG.

5 Bibliographie

- Andral B., Derolez V. (2007). Directive Cadre Eau. Mise en œuvre du Contrôle de surveillance. Résultats de la campagne 2006. District Rhône et côtiers méditerranéens. 193 p.
- Andral B., Orsoni V. (2007). Directive Cadre Eau. Mise en œuvre du Contrôle de surveillance. Résultats de la campagne 2006. District Corse. 144 p.
- Andrisoa A., Stieglitz T.C., Rodellas V., Raimbault P. (2019). Primary production in coastal lagoons supported by groundwater discharge and porewater fluxes inferred from nitrogen and carbon isotope signatures. *Marine Chemistry* 210 (2019) 48-60.
- Benau L. (2020). Suivi des rejets des stations d'épuration proches des étangs et autres tributaires, estimation de leur impact sur les milieux lagunaires. Etangs de Bages-Sigean et de La Palme. Résultats de l'année 2019. 45 p.
- Belin, C., Lamoureux, A., Soudant, D. (2014). Évaluation de la qualité des eaux littorales de la France métropolitaine pour l'élément de qualité Phytoplancton dans le cadre de la DCE. État des lieux des règles d'évaluation, et résultats pour la période 2007-2012. Tome 1 - État des lieux, méthodes et synthèse des résultats. 159 p. <https://doi.org/10.13155/50490>
- Bouchoucha M., Derolez V., Munaron D., Gonzalez J.-L., Cimiterra N., Tomasino C. (2019). Directive Cadre sur l'Eau. Bassin Rhône Méditerranée Corse - Année 2018. 83 p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00620/73224/>
- Brun M., Soudant D. (2015). Synthèse bibliographique relative à la notion d'indicateur dans le contexte de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Rapport ODE/DYNECO/VIGIES/15-01, 68 p. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00247/35858/>
- David, M., Bailly-Comte V., Munaron D., Fiandrino A., Stieglitz T.C. (2019). STOTEN 677 : 142-155. Groundwater discharge to coastal streams – A significant pathway for nitrogen inputs to a hypertrophic Mediterranean coastal lagoon. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.233>
- Derolez V., Bec B., Cimiterra N., Foucault E., Messiaen G., Fiandrino A., Malet N., Munaron D., Serais O., Connes C., Gautier E., Hatey E., Giraud A. (2021). OBSLAG 2020 - volet eutrophisation Lagunes méditerranéennes (période 2015-2020). Etat DCE de la colonne d'eau et du phytoplancton, tendance et variabilité des indicateurs. 78 p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00696/80768/>
- Derolez V., Bec B., Munaron D., Foucault E., Fiandrino A., Ouisse V., Messiaen G., Hatey E., Connes C., Soudant D., Brun M., Fortune M., Mortreux S., Serais O., Crottier A., Malet N. (2019). OBSLAG 2018 - volet eutrophisation. Lagunes méditerranéennes (période 2013-2018). Etat DCE de la colonne d'eau et du phytoplancton, tendance et variabilité des indicateurs. RST/LER/LR/19.12. 75 p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00507/61862/>
- Derolez V., Gimard A., Munaron D., Ouisse V., Messiaen G., Fortuné M., Poirier S., Mortreux S., Guillou J.-L., Brun M., Provost C., Hatey, E., Bec B., Malet N., Fiandrino A. (2017). OBSLAG 2016 – volet eutrophisation. Etat DCE des lagunes méditerranéennes (eau et phytoplancton, période 2013-2018). Développement d'indicateurs de tendance et de variabilité. 75 p. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00386/49744/>
- Derolez V., Oheix J., Ouisse V., Munaron D., Fiandrino A., Messiaen G., Hubert C., Lamoureux A., Malet N., Fortuné M., Berard L., Mortreux S., Guillou J.-L. (2015). Suivi estival des lagunes méditerranéennes françaises - Bilan des résultats 2014. 85 p. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00273/38461/>
- Dunn O.J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6, pp. 241-252.
- Efron B., 1995. Le bootstrap et ses applications. C.I.S.I.A., Saint-Mandé, 217 p.
- Gilbert R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Wiley, NY, 336 p.
- Gimard A. (2016). Analyse des tendances et de la variabilité des indicateurs de l'état écologique DCE, phytoplancton et physico chimie, dans les lagunes méditerranéennes. Rapport d'alternance de Master

2-IEGB, Biodiversité Écologie Évolution, Université de Montpellier. 66 p.

Herlory O., Briand M., Bouchouca M., Derolez V., Munaron D., Cimiterra N., Tomasino C., Gonzalez J.L., Giraud A., Boissery P. (2022). Directive Cadre sur l'Eau. Bassin Rhône Méditerranée Corse - Année 2021. 89 p. <https://doi.org/10.13155/93161>

Kendall M.G. (1975). Rank Correlation Methods. 4th edition, Charles Griffin, London.

Kruskal W.H., Wallis W.A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association, 47, pp. 583-621.

Mann H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, pp. 245-259.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, MTEs (2018a). Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement, 76 p.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, MTEs (2018b). Arrêté du 17 octobre 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, MTEs (2018c). Guide relatif aux règles d'évaluation de l'état des eaux littorales dans le cadre de la DCE. 277 p. <https://professionnels.afbiodiversite.fr/sites/default/files/pdf/estuaires/GuideREEEL-DCE-MTES2018.pdf>

Morin V., Morin J.F., Mercier M., Moineau M.P., Codet J.P. (1998). Les courbes ROC en biologie médicale ; Clock around the ROC. Immuno-analyse & biologie spécialisée, 13(5), 279-286. [https://doi.org/10.1016/S0923-2532\(98\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0923-2532(98)80016-1)

Sargian P., Andral B., Derolez V. et al. (2013a). Réseaux de surveillance DCE - Campagne 2012 – District « Rhône et côtiers méditerranéens ». 132 p.

Sargian P., Andral B., Derolez V. et al. (2013b). Réseaux de surveillance DCE – Campagne 2012 – District « Corse ». 109 p.

Soudant D. (2008). Confiance et précision. Approche pour les eaux littorales. Séminaire Aquaref, 3-4 juin 2008.

Witkowski F., Andral B., Derolez V., Tomasino C. (2016). Campagne de surveillance 2015 (DCE et DCSMM) en Méditerranée française. Districts « Rhône et côtiers méditerranéens » et « Corse ». Convention AERMC / Ifremer n° 2014-2292. 221 p.

6 Annexes

6.1 Glossaire (d'après Belin *et al.*, 2014 et Brun et Soudant, 2015)

Confiance : probabilité, en %, que la vraie valeur d'un indice statistique soit incluse dans un intervalle.

Ecological Quality Ratio (EQR) : rapport entre la valeur de la grandeur d'intérêt et une valeur de référence pour cette même grandeur, tel qu'un résultat de 0 indique la plus mauvaise valeur et un résultat de 1 indique la meilleure valeur.

Élément de qualité : caractéristique permettant d'évaluer le degré d'accomplissement du bon état écologique. Par exemple, l'état écologique des masses d'eaux lagunaires est actuellement évalué selon 4 éléments de qualité : physico-chimie de la colonne d'eau, phytoplancton, macrophytes et macrofaune benthique.

Grille de diagnostic : tableau composé de quatre valeurs définissant les frontières entre les états très bon/bon, bon/moyen, moyen/médiocre et médiocre/mauvais.

Indicateur : combinaison de plusieurs indices ou métriques, à partir d'une règle d'agrégation définie à l'échelle européenne, pour évaluer un élément de qualité. Par exemple, l'indicateur phytoplancton est calculé à partir de deux indices, la biomasse et l'abondance.

Intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) : Intervalle à l'intérieur duquel on a 95% de chances que les valeurs d'un indice statistiques soient incluses. $IC = [M - p ; M + p]$; avec : M = moyenne estimée, p = précision.

Métrique : méthode de calcul mais aussi résultat de son application à l'ensemble des données d'un paramètre : par exemple le percentile 90 des données de chlorophylle *a* est une métrique.

Paramètre : propriété du milieu ou d'un élément du milieu qui contribue à en apprécier les caractéristiques et/ou la qualité : par exemple la mesure de la chlorophylle *a*, ou bien la concentration d'un nutriment dans un échantillon d'eau de mer.

Période de diagnostic : durée prise en compte pour l'agrégation temporelle des données en vue de l'évaluation de l'état des eaux. La période de diagnostic est souvent adaptée à la durée des plans de gestion de la DCE, soit 6 années.

P90, percentile 90 : valeur en-dessous de laquelle se trouvent au moins 90% des valeurs du jeu de données.

Règle d'intégration : méthode visant à combiner les métriques ou les indices afin de caractériser l'état écologique au niveau des éléments de qualité.

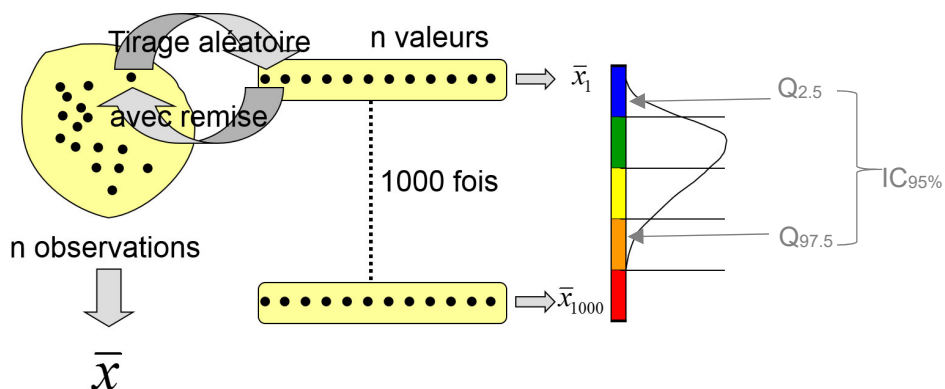
Règle d'agrégation spatiale et temporelle : méthode visant à synthétiser les résultats des paramètres dans le cas des masses d'eau suivies sur plusieurs stations (agrégation spatiale), et dans le cas des paramètres suivis à plusieurs reprises lors de la période de diagnostic (agrégation temporelle).

Valeur de référence : valeur de très bon état fixée par expertise ou consensus européen, d'une métrique.

6.2 Méthode du bootstrap appliquée pour le calcul des intervalles de confiance (Soudant, 2008)

La méthode de bootstrap non paramétrique s'appuie sur le fait de pouvoir, en ré-échantillonnant parmi les données, estimer les caractéristiques du phénomène aléatoire qui a engendré ces données (Efron, 1995). Elle permet par ailleurs de s'affranchir de la nécessité pour la population de respecter une distribution suivant une loi normale. Le principe du bootstrap est le suivant : l'ensemble des mesures relevées pour un échantillon de taille n . Dans l'exemple du paramètre NT de l'élément de qualité « physico-chimie de l'eau », $n=18$ (soit 3 mois d'été x 6 années). Dans cet échantillon, un tirage au sort (aléatoire) d'une mesure est réalisé, en utilisant le mois comme élément stratifiant afin de tenir compte de la saisonnalité des phénomènes (pour éviter de ne ré-échantillonner par exemple que des données obtenues au mois d'août). Après avoir réintégré au jeu de données la mesure déjà tirée, l'opération est réitérée n fois (tirage avec remise) (Figure 8). Sur ce nouvel échantillon de taille n (dans lequel certaines mesures peuvent donc être tirées en doublons), le calcul de l'indicateur est appliqué. Le tirage est répété 1000 fois, ce qui fournit 1000 indicateurs. Parmi ces 1000 indicateurs, les quantiles 2.5 ($Q_{2.5}$) et 97,5 ($Q_{97.5}$) sont sélectionnés afin d'obtenir **un intervalle de confiance à 95% pour l'indicateur ($IC_{95\%}$)**. Si les données d'origine sont très dispersées, les 1000 indicateurs le seront et l'intervalle de confiance sera large.

Si une métrique contient plusieurs paramètres, alors chacun fait l'objet d'un bootstrap et chaque rééchantillonnage est utilisé pour produire un résultat de métrique. Il en va de même pour un EQR constitué de plusieurs métriques (NB : les bootstraps n'ont pas encore été appliqués aux paramètres abondance du nano- et du phytoplancton).



D. Soudant, Aquaref, 3 et 4 juin 2008

Figure 8. Schématisation de la méthode de bootstrap pour le calcul de l'intervalle de confiance (en grisé) et la répartition des valeurs de l'indicateur selon les 5 classes de qualité DCE (Soudant, 2008).

6.3 Tests de Mann Kendall et de Kruskal-Wallis

Le test de Mann Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975 ; Gilbert, 1987) est un test non paramétrique fondé sur les rangs, c'est-à-dire que les données sont comparées deux à deux, un signe positif étant attribué si la $k^{\text{ième}}$ valeur est supérieure à la $n^{\text{ième}}$ valeur, avec $k > n$. La somme de ces signes, ainsi que la variance associée, sont utilisées pour produire la statistique du test. Le signe de la statistique Z indique le sens de la tendance des données. Cette valeur est ensuite comparée à la statistique de la distribution normale afin de déterminer la p-value associée au test. L'hypothèse nulle de l'existence d'une tendance monotone est testée avec l'erreur de première espèce fixée à 5% (i.e. p-value strictement inférieure à 0.05).

L'analyse de Kruskal-Wallis (Kruskal et Wallis, 1952) permet d'identifier si les valeurs des indicateurs ou indices/métriques d'au moins une des années de la période de diagnostic sont significativement différentes des valeurs des autres années (en comparant les rangs moyens des valeurs de chaque année). En cas de différence significative détectée par le test de Kruskal-Wallis, le test post-hoc de Dunn (Dunn, 1964) permet de repérer la ou les années différentes les unes des autres.

6.4 Dénombrements des cas de vrais/faux positifs et négatifs pour l'estimation de la sensibilité et de la spécificité du test de Mann Kendall

Tableau 10. Nombres de cas rencontrés lors de la comparaison des conclusions données par le test de Mann Kendall pour une période de diagnostic (lignes) et des observations de la période suivante (colonnes) pour les 70 couples de diagnostics de la **physico-chimie de l'eau de 2009 à 2021**. Les cas discordants sont représentés par des cases orangées et les cas concordants par des cases vertes.

Observations de la période suivante Tendance identifiée pour une période (test de Mann Kendall)	Perte d'une classe de qualité par rapport à la période précédente	Même classe de qualité qu'en période précédente	Gain d'une classe de qualité par rapport à la période précédente	
Tendance monotone à la dégradation	Concordant "vrai positif" = 2	Discordant "faux positif" = 19*	Discordant "faux positif" = 0	21 cas*
Pas de tendance monotone	Discordant "faux négatif" = 0	Concordant "vrai négatif" = 35	Discordant "faux négatif" = 2	37 cas
Tendance monotone à l'amélioration	Discordant "faux positif" = 1	Discordant "faux positif" = 10**	Concordant "vrai positif" = 1	12 cas**
	3 cas	64 cas***	3 cas	70 cas

* dont 4 cas de tendances à la dégradation pour des états déjà « Mauvais » ; ** dont 3 cas de tendances à l'amélioration pour des états déjà « Très bons » ; *** dont les 7 cas cités ci-avant.

Tableau 11. Nombres de cas rencontrés lors de la comparaison des conclusions données par le test de Mann Kendall pour une période de diagnostic (lignes) et des observations de la période suivante (colonnes) pour les 70 couples de diagnostics du **phytoplancton de 2009 à 2021**. Les cas discordants sont représentés par des cases orangées et les cas concordants par des cases vertes.

Observations de la période suivante Tendance identifiée pour une période (test de Mann Kendall)	Perte d'une classe de qualité par rapport à la période précédente	Même classe de qualité qu'en période précédente	Gain d'une classe de qualité par rapport à la période précédente	
Tendance monotone à la dégradation	Concordant "vrai positif" = 1	Discordant "faux positif" = 9*	Discordant "faux positif" = 0	10 cas*
Pas de tendance monotone	Discordant "faux négatif" = 1	Concordant "vrai négatif" = 41	Discordant "faux négatif" = 6	48 cas
Tendance monotone à l'amélioration	Discordant "faux positif" = 0	Discordant "faux positif" = 10**	Concordant "vrai positif" = 2	12 cas**
	2 cas	60 cas***	8 cas	70 cas

* dont 2 cas de tendances à la dégradation pour des états déjà « Mauvais » ; ** dont 3 cas de tendances à l'amélioration pour des états déjà « Très bons » ; *** dont les 5 cas cités ci-avant.

6.5 Représentation de l'amplitude des intervalles de confiance

Tableau 12. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état du phytoplancton pour les périodes 2014-2019 et 2015-2020 à Berre.

Indicateur	P90	EQR	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Man Kendall)
Période 2014-2019						
Etat du phytoplancton « moyen »						
Métrique de biomasse	6.8 µg/L	0.49	[0.33;0.59]	0-70-23-7-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	42.7 10 ⁶ cell/L	0.35	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	10.9 10 ⁶ cell/L	0.28	-	-	Valeurs de 2016 supérieures à celles de 2018	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.28	[0.17;0.38]	0-24-76-0-0		
Indicateur phytoplancton		0.38	[0.26;0.47]	0-44-56-0-0		
Période 2015-2020						
Etat du phytoplancton « bon »						
Métrique de biomasse	6.1 µg/L	0.55	[0.34;0.59]	0-77-23-0-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	28.5 10 ⁶ cell/L	0.53	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	9.9 10 ⁶ cell/L	0.3	-	-	Valeurs de 2016 supérieures à celles de 2017 et 2018	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.3	[0.17;0.43]	0-55-45-0-0		
Indicateur phytoplancton		0.42	[0.31;0.5]	0-75-25-0-0		

Nombre de classes de qualité couvertes par l'IC :

	1
	2
	3
	4
	5

Tableau 13. Valeurs des métriques de l'indicateur de l'état du phytoplancton pour les périodes 2015-2020 et 2016-2021 sur les Palavasiens-Ouest.

Indicateur	P90	EQR	IC de l'EQR	Confiance (% par classe)	Années particulières (Kruskal-Wallis)	Tendance (Man Kendall)
Période 2015-2020						
Etat du phytoplancton « moyen »						
Métrique de biomasse	7 µg/L	0.48	[0.25;0.67]	2-41-52-5-0	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	85.3 10 ⁶ cell/L	0.18	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	7.5 10 ⁶ cell/L	0.4	-	-	Valeurs de 2015 et 2017 supérieures à celles de 2016 et 2020	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.18	[0.08;0.59]	0-26-39-36-0		
Indicateur phytoplancton		0.33	[0.19;0.54]	0-25-69-7-0		

Nombre de classes de qualité couvertes par l'IC :

	1
	2
	3
	4
	5

Période 2016-2021						
Etat du phytoplancton « bon »						
Métrique de biomasse	7 µg/L	0.48	[0.25;0.95]	14-29-51-6-0	Valeurs de 2017 et 2020 supérieures à celles de 2021	Pas de tendance
Pico-phytoplancton	48.4 10 ⁶ cell/L	0.31	-	-	Pas d'année particulière	Pas de tendance
Nano-phytoplancton	6.8 10 ⁶ cell/L	0.44	-	-	Valeurs de 2017 supérieures à celles de 2016, 2020 et 2021	Pas de tendance
Métrique d'abondance		0.31	[0.11;0.68]	1-43-44-12-0		
Indicateur phytoplancton		0.39	[0.22;0.61]	1-44-51-4-0		

NB : les bootstraps n'ont été appliqués qu'au niveau des EQR (biomasse, abondance et indicateur phytoplancton) et pas au niveau des abondances du nano- et du pico-phytoplancton, ce qui explique l'absence des intervalles et indices de confiance pour ces paramètres.