

Rapport final 2024

BATMAN : Variation du métabolisme des communautés planctoniques face à l'eutrophisation du littoral Martiniquais



Sommaire

1. Introduction	3
2. Objectifs du projet	5
3. Méthodologie	5
4. Résultats	7
5. Conclusion	12
6. Références	13
7. Remerciements	14

1. Introduction

Les eaux tropicales de la Mer des Caraïbes sont réputées oligotrophes et donc caractérisées par une faible production primaire (Paulmier 2004). Cependant, dans certaines de ces îles, comme en Martinique, des zones sensibles à l'eutrophisation ont été récemment répertoriées (Sechaud et al. 2021). Les caractéristiques physico-chimiques de ces masses d'eau dites sensibles peuvent permettre le développement massif de certaines communautés planctoniques et induire des phénomènes d'eaux colorées. Si ces phénomènes devaient s'intensifier, ils pourraient causer l'anoxie du milieu et provoquer la mort de certaines espèces démersales et benthiques.

Dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), des prélèvements d'eau de mer sont réalisés autour du littoral de la Martinique afin de suivre l'état des masses d'eaux littorales et de les classer (bon à médiocre) grâce à des indicateurs physico-chimiques et biologiques. Pour cela, des prélèvements sont réalisés de manière bimensuelle pour évaluer la diversité, mesurer les paramètres physiques et doser les nutriments, les pigments ainsi que certains contaminants chimiques. Dans le dernier rapport sur les zones sensibles à l'eutrophisation en Martinique de 2021 (Sechaud et al. 2021), deux masses d'eau ont été classées en état médiocre et sept en état moyen. La dégradation de la qualité de certaines masses d'eau est la conséquence directe des diverses pressions existantes sur le littoral martiniquais. L'une des principales pressions est la défaillance des systèmes d'assainissement. Avec plus de 200t/an d'azote et 23t/an de phosphore rejeté dans le milieu marin, les systèmes d'assainissement collectif et non collectif sont l'une des principales pressions exercées sur le milieu marin. L'agriculture exerce également une pression non négligeable sur les masses d'eaux côtières dépendant de la culture, du sol et de la pluviométrie. L'aquaculture marine engendre aussi des rejets modérés de nutriments dans le milieu avec un apport de 3t d'azote/an dans les eaux côtières (Office de l'Eau Martinique, 2019). Des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) sont aussi susceptibles d'avoir des rejets en milieu naturel (26 ICPE au total). En 2017, ce sont au total 7t d'azote et 1.5t de phosphore qui ont été rejetés par seulement 7 ICPE. Les 19 autres ICPE n'ont pas fait de communication sur leurs rejets. Les exploitations industrielles déclarent en moyenne un rejet de 25t de MES/an (matière en suspension). Parallèlement à ces pressions, la présence de radeaux de sargasses peut

également modifier les communautés planctoniques associées à ces radeaux en ayant un impact sur la concentration en oxygène, le pH et en enrichissant le milieu en contaminants comme l'arsenic. Compte tenu du confinement de certaines masses d'eaux côtières, les pressions exercées par ces facteurs sont considérées comme fortes.

Des projets présents et passés permettent d'évaluer l'état des écosystèmes côtiers du littoral martiniquais. En effet, la campagne Madibenthos (financée par le Fonds européen de développement régional, FEDER, 2016) a permis d'évaluer l'état des récifs coralliens et a mis en évidence l'état dégradé des communautés coralliennes sur certaines zones. Actuellement, le projet OLITROP (financé par l'Agence Française du Développement, AFD, 2022-2023) ambitionne de développer des indicateurs pour une meilleure gestion des phénomènes d'eutrophisation en zones tropicales (*via* entre autres l'utilisation d'images satellites pour observer la dynamique de la chlorophylle-*a* et de la turbidité). De même, le projet MadiBloom (financé par Ifremer et l'Office de l'Eau Martinique, 2022-2023) avait pour objectifs d'améliorer les connaissances sur les micro-organismes responsables des phénomènes d'eaux colorées survenant sur le littoral martiniquais et d'identifier les zones où ces phénomènes sont récurrents. En parallèle, le projet SAVE-C financé en partie par l'ANR Sargasse (2020-2023) ambitionnait d'estimer la diversité (phytoplancton, zooplancton, bactéries et virus) associée aux radeaux de sargasses et d'étudier les interactions trophiques et chimiques entre les organismes des radeaux présents en Martinique et en Guadeloupe. Bien qu'un intérêt grandissant soit observé de la part de la communauté scientifique pour estimer l'état des écosystèmes côtiers tropicaux soumis à des pressions variées, des efforts de recherche restent à réaliser et particulièrement, sur la dynamique des efflorescences massives de certaines communautés planctoniques.

Afin de mieux comprendre l'évolution des efflorescences massives de micro-organismes observées sur le littoral martiniquais, il est essentiel d'approfondir nos connaissances sur les caractéristiques écophysiologiques de ces efflorescences comme l'état trophique des communautés planctoniques. En effet, la dynamique et le métabolisme des communautés planctoniques (production primaire et respiration) sont intrinsèquement associés aux variables environnementales telles que la température, la lumière, les nutriments, les processus de transport et biotiques comme la croissance et le broutage

(Townsend et al. 1994). La production primaire et la respiration de la communauté planctonique pourraient donc être stimulées et augmentées comme peuvent l'indiquer les pics de chlorophylle-*a* (chl-*a*) lors des efflorescences planctoniques, mais pas forcément à la même vitesse. En effet, un déséquilibre entre la production primaire (P) et la respiration (R) pourrait être observé lors de ces efflorescences montrant des communautés planctoniques majoritairement en état d'autotrophie ($P > R$) ou en état d'hétérotrophie ($R > P$). L'évaluation de la balance métabolique des communautés planctoniques permettra d'estimer l'état trophique des communautés et de savoir si elles agissent comme un puit de CO₂ (autotrophie) ou une source de CO₂ (hétérotrophie) pour l'atmosphère.

2. Objectifs du projet

Nous proposons lors de ce projet exploratoire BATMAN d'évaluer les variations du métabolisme des communautés planctoniques pour deux masses d'eaux côtières de la Martinique (une en état médiocre l'autre en bon état) au cours de la période cyclonique. Aussi, ce projet a pour objectif de comprendre la dynamique des communautés lors d'efflorescences de micro-organismes survenant dans les eaux littorales de Martinique.

3. Méthodologie

La campagne de prélèvements s'est tenue sur deux stations suivies dans le cadre de la DCE (Fig. 1): la Baie du Robert (qualité de l'eau médiocre, confinement de la masse d'eau, pression modérée et forte fluctuation de chl-*a*) et Fond Boucher (bonne qualité de l'eau, pression faible et absence de fluctuation de chl-*a*). Des échantillons d'eau de mer de surface ont été prélevés chaque semaine, deux fois par semaine en juillet et août. L'échantillonnage a été proposé pour la période de la saison des pluies pendant laquelle les efflorescences de micro-organismes sont plus récurrentes et massives. L'échantillonnage dans la Baie du Robert a été effectué au point de prélèvement du suivi DCE à l'aide d'une embarcation à moteur (< 1 mile de la côte) tandis que l'échantillonnage à Fond Boucher a été effectué du bord de la plage.

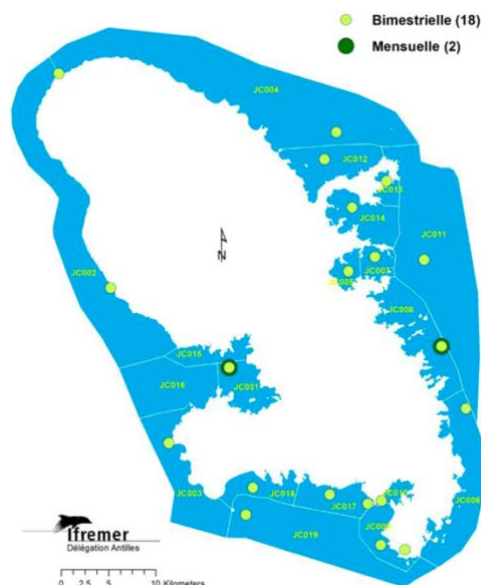


Figure 1. Localisation des stations REPHY sur le littoral martiniquais prélevés en mensuelle et bimensuelle avec nos stations de prélèvement BATMAN : JC002, Fond Boucher et JC005, Baie du Robert.

Détails de l'échantillonnage : Les prélèvements d'eau de surface ont été réalisés au lever du jour à Fond Boucher (45-50 min de trajet depuis la Station Ifremer des Antilles) avant de procéder à ceux en Baie du Robert (point DCE, < 1 mile nautique) pour prélever l'eau de mer en surface. Les bouteilles Winkler ont été incubées à 1 m de profondeur dans ces cages aquacoles afin de reproduire une incubation à température et lumière *in situ*.

Aux deux points de prélèvements, l'eau de mer en surface a été prélevée à l'aide d'un sceau de 5l. Une fois prélevée, l'eau a été directement répartie dans 15 bouteilles Winkler (10 transparentes et 5 noires) en faisant attention à ne pas introduire de bulles d'air lors de leur remplissage. Les bouteilles ont été maintenues à l'obscurité dans une glacière jusqu'à leur mise en incubation dans les cages aquacoles de la station Ifremer des Antilles. *A posteriori*, des échantillons ont été prélevés pour l'analyse de la concentration en chlorophylle, de la composition pigmentaire phytoplanctonique, de l'abondance phytoplanctonique et bactérienne, de la concentration en nutriments inorganiques et de la taxonomie phytoplanctonique.

Méthodes : Le métabolisme des communautés planctoniques a été mesuré par la méthode de *dark-light* (Carpenter 1965, Carrit and Carpenter 1966) en utilisant la méthode de titration à haute précision (Titrino plus 848) permettant de mesurer les changements en oxygène après 24h d'incubation. Cinq bouteilles Winkler opaques (noires) et cinq transparentes ont été remplies avec précaution et mises

à incuber pendant 24h *in situ* (cages). Cinq autres bouteilles Winkler transparentes ont été remplies doucement et la concentration en O₂ y a été mesurée le jour même (concentration d'O₂ initiale). La respiration (R) et la production primaire nette (NCP) de la communauté planctonique ont été estimées à partir des changements en O₂ entre la concentration d'O₂ initiale et celle après les incubations à l'obscurité et à la lumière. La production primaire brute (GPP) a été calculée à partir de l'équation suivante : $GPP = NCP + CR$.

Un volume d'eau de mer (2 à 3 litres) a été prélevé puis filtré sur un filtre GF/F (Whatman), sur un filtre PC 3µm mais aussi à travers une soie de 20 µm puis récupéré sur un filtre GF/F (Whatman). Les analyses en fluorimétrie ont été effectuées par la suite au laboratoire Pelagos à DYNECO (Centre Bretagne d'Ifremer) pour estimer la concentration en chlorophylle, Chl-*a*, en fonction des trois classes de tailles différentes (totale, <20 µm, >3µm). Des échantillons pour l'analyse des nutriments inorganiques (phosphate, silicate, nitrate+nitrite, ammonium) ont été collectés, pasteurisés à 80°C à l'étuve pendant 2h, puis analysés au retour au laboratoire Pelagos à l'aide d'un auto-analyseur Bran Lebe AA3. Des échantillons ont été répartis dans des cryotubes de 2ml avec 60µl de glutaraldéhyde 25%, conservés dans de l'azote liquide puis analysés au retour au laboratoire Pelagos par un cytomètre en flux (Novocyte, Agilent) pour estimer l'abondance phytoplanctonique et bactérienne.

4. Résultats

Tableau 1. Données physico-chimiques (moyenne ± erreur standard) de La Baie du Robert et de Fond Boucher pendant la campagne de prélèvements de Juillet-Août 2024. Salinité, température de l'eau de surface (°C), azote inorganique dissous (NID, µmol.l⁻¹), phosphore inorganique dissous (PID, µmol.l⁻¹), silicate (µmol.l⁻¹) et ammonium (µmol.l⁻¹). La présence d'astérisque montre une différence significative entre les deux stations pour un même paramètre (test de Wilcoxon, α = 0,05).

	Baie du Robert	Fond Boucher
Salinité	34,19 ± 0,1	34 ± 0,17
Température (°C)	30,17 ± 0,1*	28,88 ± 0,07*
NID (µmol.l ⁻¹)	0,7 ± 0,3	0,75 ± 0,22
PID (µmol.l ⁻¹)	0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,03
Silicates (µmol.l ⁻¹)	5,46 ± 0,25*	12,46 ± 1,77*
Ammonium (µmol.l ⁻¹)	3,52 ± 0,96	2,87 ± 0,74

Les données physico-chimiques n'ont pas révélé de différences marquées entre les deux stations de prélèvement, à l'exception de la température et de la concentration en silicates. En effet, la station de Fond Boucher présentait une température plus basse que celle du Robert, ainsi qu'une concentration en silicates nettement plus élevée (Tableau 1). Cette différence peut s'expliquer par la nature du sédiment qui peut avoir un impact sur la composition phytoplanctonique. À Fond Boucher, le sable noir d'origine volcanique est riche en silicates qui peuvent se dissoudre dans l'eau de mer en libérant du silicium (Si(OH)_4). Le silicium est indispensable pour la synthèse du frustule (coque siliceuse) des diatomées surtout si les autres paramètres nécessaires pour la photosynthèse sont présents (azote, phosphore, lumière). Sur la côte Atlantique où se situe la Baie du Robert, le sédiment qui est plutôt d'origine corallienne est riche en carbonate de calcium qui favoriserait la croissance d'autres groupes de microalgues.

Bien que la station du Robert soit située dans une zone soumise à différentes pressions anthropiques et à un risque d'eutrophisation, les concentrations en nutriments (nitrate + nitrite, phosphate et ammonium) n'y diffèrent pas de celles mesurées à Fond Boucher (Tableau 1).

Tableau 2. Données biologiques (moyenne \pm erreur standard) en chlorophylle totale (Chl_tot, $\mu\text{g.l}^{-1}$), pour le microphytoplancton ($>20\mu\text{m}$; Chl_micro, $\mu\text{g.l}^{-1}$), pour le nanophytoplancton ($<20\mu\text{m}$; Chl_nano, $\mu\text{g.l}^{-1}$) et pour le picophytoplancton ($<3\mu\text{m}$; Chl_pico, $\mu\text{g.l}^{-1}$), abondance bactérienne ($10^6 \text{ cell.ml}^{-1}$), abondance du nanophytoplancton (cell.ml^{-1}), du picophytoplancton (cell.ml^{-1}), et des cyanobactéries *Prochlorococcus* (cell.ml^{-1}) et *Synechococcus* ($10^6 \text{ cell.ml}^{-1}$). La présence d'astérisque montre une différence significative entre les deux stations pour un même paramètre (test de Wilcoxon, $\alpha = 0,05$).

	Baie du Robert	Fond Boucher
Chl_tot ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	0,84 \pm 0,16*	0,33 \pm 0,05*
Chl_micro ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	0,17 \pm 0,08	0,08 \pm 0,02
Chl_nano ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	0,16 \pm 0,04	0,15 \pm 0,04
Chl_pico ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	0,58 \pm 0,09*	0,13 \pm 0,002*
Bactéries ($10^6 \text{ cell.ml}^{-1}$)	1,95 \pm 0,18*	0,85 \pm 0,004*
Nanoplancton (cell.ml^{-1})	3650 \pm 740*	1143 \pm 259*
Picoplancton (cell.ml^{-1})	4284 \pm 588*	2100 \pm 194*
<i>Prochlorococcus</i> (cell.ml^{-1})	96 \pm 20*	570 \pm 132*
<i>Synechococcus</i> ($10^6 \text{ cell.ml}^{-1}$)	0,15 \pm 0,02*	0,02 \pm 0,003*

En revanche, les données biologiques mettent en évidence des différences notables entre les deux sites. Les biomasses phytoplanctonique totale, ainsi que celle du picophytoplancton, sont respectivement 2,5 et 4 fois plus élevées au Robert qu'à Fond Boucher (Tableau 2). Ces différences significatives entre les deux sites se retrouvent également dans l'évolution temporelle de la chlorophylle totale et du picophytoplancton (Fig. 2).

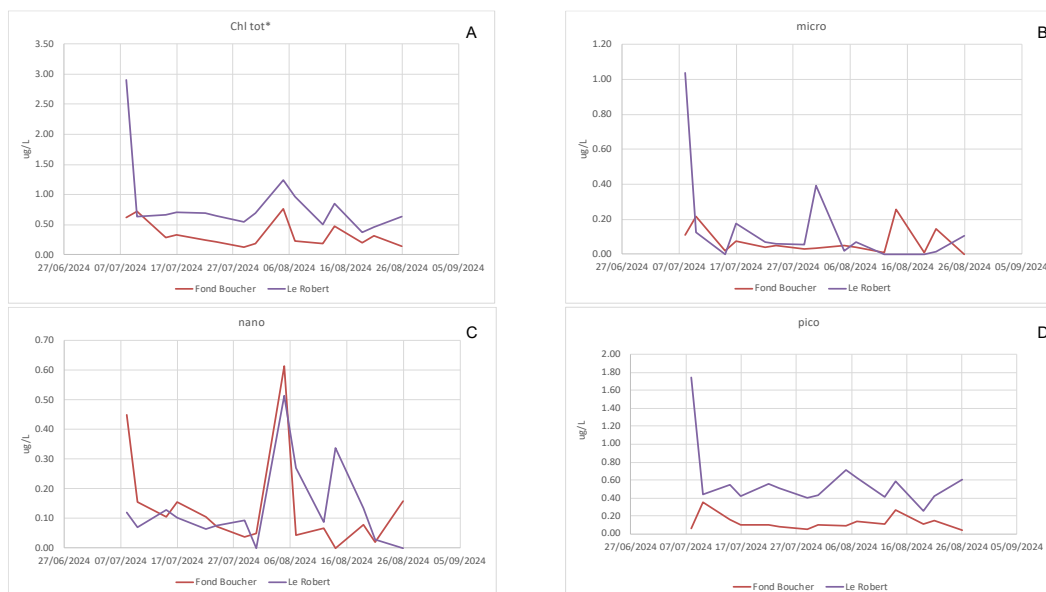


Figure 2. Concentration en Chl_tot (A), Chl_micro (B), Chl_nano (C) et Chl_pico (D) ($\mu\text{g.l}^{-1}$) en fonction du temps pour le site du Fond Boucher (ligne rouge) et de la Baie du Robert (ligne bleue).

De même, les abondances phytoplanctoniques et bactériennes sont au moins deux fois supérieures au Robert qu'à Fond Boucher (Tableau 2). Ces différences significatives entre les deux sites se retrouvent également dans l'évolution temporelle de l'abondance phytoplanctonique et bactérienne (Fig. 3).

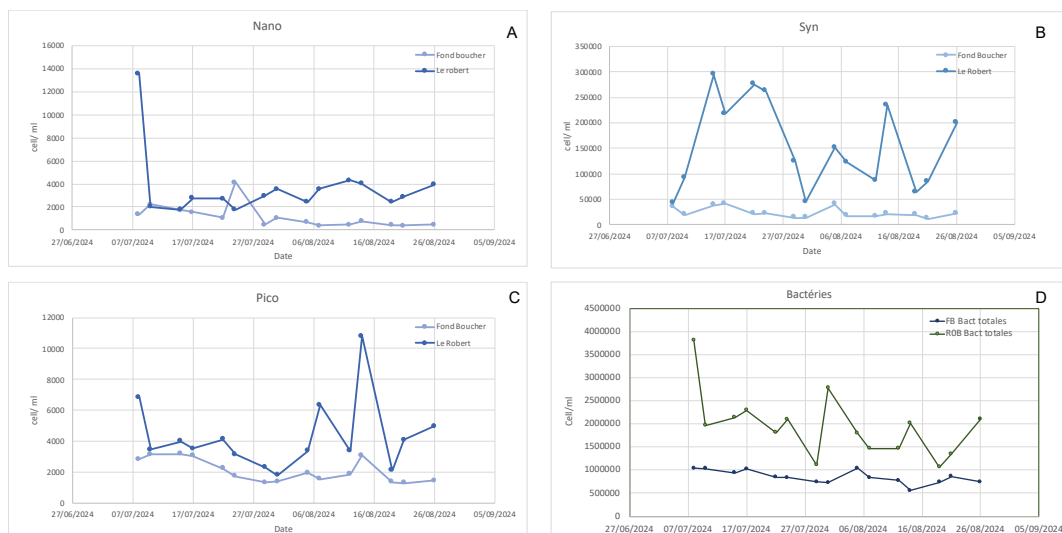


Figure 3. Abondance en nanophytoplancton (A), *Synechococcus* (B), picophytoplancton (C) et bactéries (D) (cell.ml^{-1}) en fonction du temps pour le site du Fond Boucher et de la Baie du Robert.

Tandis que les abondances en *Synechococcus*, en picophytoplancton et en bactéries présentent peu de variations au cours du temps à Fond Boucher, elles peuvent être jusqu'à trois fois plus élevées selon les périodes au Robert (Fig. 3).

En revanche, l'abondance en nanophytoplancton montre des fluctuations relativement faibles au cours du temps sur les deux sites (Fig. 3).

Ces écarts en termes de biomasse et d'abondance suggèrent des abondances phytoplanctoniques plus importantes au Robert qu'à Fond Boucher, probablement en lien avec les apports de nutriments anthropiques connus au Robert. Bien que les concentrations en nutriments soient comparables entre les deux stations lors de la période de prélèvement, il est plausible qu'ils aient été rapidement assimilés par le phytoplancton au Robert dès leur disponibilité dans le milieu, ce qui expliquerait l'augmentation de la biomasse observée.

Tableau 3. Moyenne et erreur standard du métabolisme planctonique (NCP, CR et GPP ; mmol O₂.m⁻³.j⁻¹) aux deux stations de prélèvement. La présence d'astérisque montre une différence significative entre les deux stations pour un même paramètre (test de Wilcoxon, $\alpha = 0,05$).

	Baie du Robert	Fond Boucher
NCP (mmol O ₂ .m ⁻³ .j ⁻¹)	0,19 ± 0,29*	-0,15 ± 0,08*
CR (mmol O ₂ .m ⁻³ .j ⁻¹)	0,60 ± 0,19	0,31 ± 0,06
GPP (mmol O ₂ .m ⁻³ .j ⁻¹)	0,80 ± 0,35*	0,16 ± 0,07*

La communauté phytoplanctonique de la Baie du Robert est plus productive que celle de Fond Boucher. En effet, la production brute mesurée est 5 fois supérieure à celle mesurée dans la Baie du Robert (Tableau 3). Toutefois, la respiration des communautés planctoniques de Fond Boucher et de la Baie du Robert sont comparables ce qui laisse supposer que la composition des communautés diffère entre les sites. Les données observées de métabolisme de la communauté planctonique sont en accord avec les données environnementales décrites au-dessus (Tableau 1 et 2). La station du Robert présente une plus forte biomasse ainsi qu'une abondance phytoplanctonique et bactérienne traduisant une production primaire et une respiration plus élevée qu'à la station de Fond Boucher.

Il semble aussi important de mentionner que la campagne d'échantillonnage a eu lieu après le passage de l'ouragan Beryl qui a provoqué de nombreux dégâts sur la côte Caraïbe en modifiant profondément le site de Fond Boucher.

Le métabolisme de la communauté planctonique montre des variations relativement faibles au cours du temps sur les deux sites (données non montrées).

5. Conclusion

Les eaux de Fond Boucher, caractérisées comme étant en bon état, présentent les traits typiques des milieux oligotrophes dominants dans la région de la mer des Caraïbes. En effet, pendant notre période d'échantillonnage, elles se sont distinguées par une faible abondance et biomasse du plancton, ainsi qu'une production primaire réduite. L'absence d'enrichissement en nutriments inorganiques dissouts, même ponctuels, a contribué à une faible variabilité de l'abondance et de la biomasse phytoplanctonique totale, du microphytoplancton et du picophytoplancton. Les communautés planctoniques observées à Fond Boucher présentaient un métabolisme hétérotrophique ($NCP < 0$ ou $P < R$), indiquant que la communauté planctonique agissait comme une source de CO_2 pour son écosystème et l'atmosphère. Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées dans la littérature pour des écosystèmes marins oligotrophes, où un métabolisme planctonique majoritairement hétérotrophique est fréquemment observé (e.g. Regaudie de Gioux et Duarte 2013, Duarte et al. 2013).

Bien que les concentrations en nutriments ne diffèrent pas significativement entre les deux stations, un effet marqué de l'apport de nutriments des eaux du Robert sur la communauté planctonique a été observé. Cet enrichissement a favorisé la croissance de la communauté en augmentant sa biomasse et son abondance, tout en stimulant à la fois la production primaire (captation de CO_2) et la respiration (relargage de CO_2). L'apport de nutriments dans la Baie de Robert semble survenir de manière ponctuelle plutôt que continue, ce qui pourrait expliquer la variabilité plus marquée dans les données biologiques (Tableau 2 et 3 ; Figure 2 et 3). Ces apports semblent avoir multiplier par un facteur 2 le métabolisme global de la communauté planctonique par rapport à un écosystème non eutrophisé (site de Fond Boucher) induisant un métabolisme autotrophique ($NCP > 0$ ou $P > R$). Si ce phénomène s'intensifie de manière incontrôlée, il est probable que la productivité et la respiration des communautés planctoniques continuent de croître, mais peut-être pas à la même vitesse. Étant

donné que la biomasse et l'abondance planctonique sont également amplifiées par l'apport en nutriment, la dégradation de matière organique — et donc la respiration — devrait s'accroître, potentiellement au détriment de la production primaire ($P < R$). Cela induirait une prévalence du métabolisme hétérotrophique au sein de la communauté planctonique, qui se comporterait alors comme une source de CO_2 pour son écosystème. Un tel déséquilibre pourrait, dans un scénario extrême, conduire à un appauvrissement en oxygène des eaux.

Les résultats présentés ont été obtenus au cours de la période cyclonique et sur deux stations présentant des qualités de masse d'eau contrastées. Afin de mieux comprendre la réponse des communautés planctoniques à différents degrés d'eutrophisation autour du littoral martiniquais, il apparaît essentiel d'étendre ces observations à une échelle spatiale et temporelle plus large. La réalisation de campagnes de mesures complémentaires, couvrant d'autres zones du littoral martiniquais ainsi que différentes saisons, permettrait d'affiner l'évaluation de la dynamique métabolique des communautés planctoniques et de mieux appréhender leur sensibilité face aux pressions anthropiques et aux variations environnementales.

6. Références

Carpenter, J.H. 1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Prog. Oceanogr.* **71**: 446–477.

Carritt, D.E. & Carpenter, J.H. 1966. Comparison and evaluation of currently employed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in seawater; a NASCO report. *J. Mar. Res.* **24**: 286–318.

Duarte, C.M., Regaudie-de-Gioux, A., Arrieta, J.M., Delgado-Huertas, A. & Agusti, S. 2013. The oligotrophic ocean is heterotrophic. *Annu. Rev. Mar. Sci.* **5**: 551-569.

Office de l'Eau Martinique. 2019. Cahier 3 – Inventaire des pressions et activités humaines. *Office de l'Eau Martinique*, 58 pp.

Paulmier, G. 2004. Étude des conditions hydrologiques et biogéochimiques associées à la formation et à la variabilité de la couche minimum d'oxygène dans l'océan tropical de l'est. *Institut océanographique, Paris/Monaco*, 296 pp.

Regaudie-de-Gioux, A. & Duarte, C.M. 2013. Global patterns in oceanic planktonic metabolism. *Limnol. Oceanogr.* **58**(3): 977-986.

Séchaud, J., Allanic, A., Blanchard, F., Marcé, R., & Office de l'Eau de Martinique. 2021. Synthèse des connaissances sur l'état de la qualité écologique des masses d'eau littorales de la Martinique. *Office de l'Eau de Martinique*, 47 pp.

Townsend, D.W., Keller, M.D., Sieracki, M.E. & Ackleson, S.G. 1994. Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Deep-Sea Res.* / **41**: 747–765.

7. Remerciements

Nous remercions l'Ifremer, l'Office de l'Eau de la Martinique, l'Observatoire Français de la Biodiversité, le Parc Naturel Marin de la Martinique et ISblue pour le financement de ce projet. Nous adressons également nos remerciements à Marie Latimier pour sa contribution à l'échantillonnage, la mise en incubation, les filtrations en laboratoire ainsi que les analyses d'oxygène, de chlorophylle et de cytométrie en flux ; à Samson Devilliers pour son aide lors des échantillonnages et de la mise en place des incubations ; à Émilie Rabillier pour les analyses en nutriments ; et à Sophie Schmitt pour les analyses de chlorophylle.