



UNIVERSITE
D'ABOMEY-CALAVI



RAPPORT DE PROJET

MASTER 2 OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Impact du réchauffement climatique sur le cycle saisonnier de la température de surface et du phytoplancton dans la partie Ouest du bassin Atlantique Tropical

Travail réalisé par :

Julio DONFACK

Héloïse HÉRON

Encadré par :

Casimir DA ALLADA

Francis AYISSI

2023 - 2024

Sommaire

1	Introduction	2
2	Zone d'étude et données	3
2.1	Zone d'étude	3
2.2	Modèles	3
2.3	Données d'observation de la température de surface	4
2.4	Données d'observation de la chlorophylle	4
3	Résultats	5
3.1	Validation du modèle	5
3.1.1	Température de surface	5
3.1.2	Chlorophylle	6
3.2	Etude des cycles saisonniers	6
3.2.1	Description des cycles saisonniers	6
3.2.2	Zones de variabilité de la température des surface et des phytoplanctons	8
3.2.3	Impacts du changement climatique	9
4	Conclusion	12

1 Introduction

L'Ouest du bassin Atlantique Tropical est marqué par un couplage atmosphère-océan intense, où les interactions dynamiques entre la surface de l'océan et l'atmosphère engendrent des répercussions sur le climat et l'écosystème. Les températures de surface (SST) jouent un rôle central dans ce processus, influençant les schémas atmosphériques, tels que la formation des nuages, les moussons, les vents ou les oscillations atmosphériques.

Ce couplage bidirectionnel crée un cycle complexe, où les variations de SST induisent des changements dans la circulation atmosphérique, les schémas des vents et les phénomènes météorologiques ([Ser+14]). En retour, ces phénomènes atmosphériques influent sur les SST et les conditions océaniques, y compris les courants, les upwellings ou downwellings, la thermocline, et, en conséquence, ont un impact sur la production primaire, essentielle à la biodiversité marine.

L'importance de cette région est accentuée par son influence sur la cellule de Hadley, un élément essentiel du système climatique ([CKK19]). Les variations latitudinales de la zone de températures maximales entre l'équateur et 10°N entraînent les oscillations de la position de la Zone InterTropicale de Convergence, déterminant la latitude de la branche ascendante de la cellule de Hadley. L'impact n'est pas limité au domaine atmosphérique, mais s'étend aussi à l'océan, où cette région joue un rôle dans la circulation thermohaline via le courant Nord-Brésilien, qui entraîne les eaux vers le Nord le long du Bord Ouest de l'Atlantique pour aller plonger vers les profondeurs dans le Nord de l'Océan. Cette circulation régit les mouvements océaniques à la fois en profondeur et en surface, influençant ainsi la répartition des diverses masses d'eau océaniques à l'échelle mondiale.

Sur le plan humain, cette région revêt une importance particulière. Les côtes de l'Ouest de l'Atlantique Tropicale abritent une grande partie de la population brésilienne qui dépend des ressources marines, notamment la pêche, pour sa subsistance. Comprendre l'impact du changement climatique dans cette zone est donc essentiel pour anticiper les changements potentiels sur les océans, la production primaire et, par extension, la biodiversité marine et les ressources nécessaires à la population de la région.

Nous allons dans cette étude nous concentrer sur l'impact du changement climatique sur la température de surface et sur les contributions à la production de chlorophylle de trois sortes de phytoplanctons, les diazotrophes, les diatomées et les petits phytoplanctons, à partir de données de modèles. Nous commençons par une présentation plus détaillée de la zone d'étude, ainsi que des modèles et des observations utilisées, avant de poursuivre sur l'analyse des données des différents modèles utilisés ici.

2.3 Données d’observation de la température de surface

Les données d’observations de température de surface proviennent de bouées amarrées de PIRATA (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic). Ces bouées permettent des mesures de température, de pression et de salinité à plusieurs profondeurs, ainsi que des mesures atmosphériques telles que le vent de surface, la température de l’air, l’humidité relative, etc. . . Les bouées mesurent et stockent les données en interne toutes les 10 minutes et transmettent quotidiennement les moyennes journalières des variables au système satellitaire ARGOS. Les données utilisées pour la validation du modèle proviennent de 2 sites de mesures : le premier, situé au nord de la zone (12°N - 38°W), a été installé pendant la phase pilote du programme, entre 1997 et 2000, et nous permet donc d’avoir des données de 2000 à 2014, soit sur toute la période du modèle historique. Le second, plus au sud (14°S - 32°W), a été installé pendant une seconde phase qui a eu lieu entre 2005 et 2006, et nous permet donc une comparaison avec le modèle à partir d’août 2005.

2.4 Données d’observation de la chlorophylle

Dans l’optique d’utiliser des données d’observation qui ont la même résolution que les données de notre modèle, afin de bien valider notre modèle, nous avons choisi de télécharger comme observations les données Global Ocean Satellite Observations ACRI-ST, un produit mensuel de Global Ocean colour (Copernicus-GlobColour), Bio-Geo-Chemical, L4(monthly and interpolated) from Satellite Observations (1997-ongoing) ; c’est une analyse construite en combinant les observations de différentes plateformes (satellites, navires, bouées et flotteurs Argo) sur une grille mondiale régulière. Une carte de CHL spatialement complète est produite par interpolation pour combler les lacunes ([[Eur22](#)])

3 Résultats

3.1 Validation du modèle

3.1.1 Température de surface

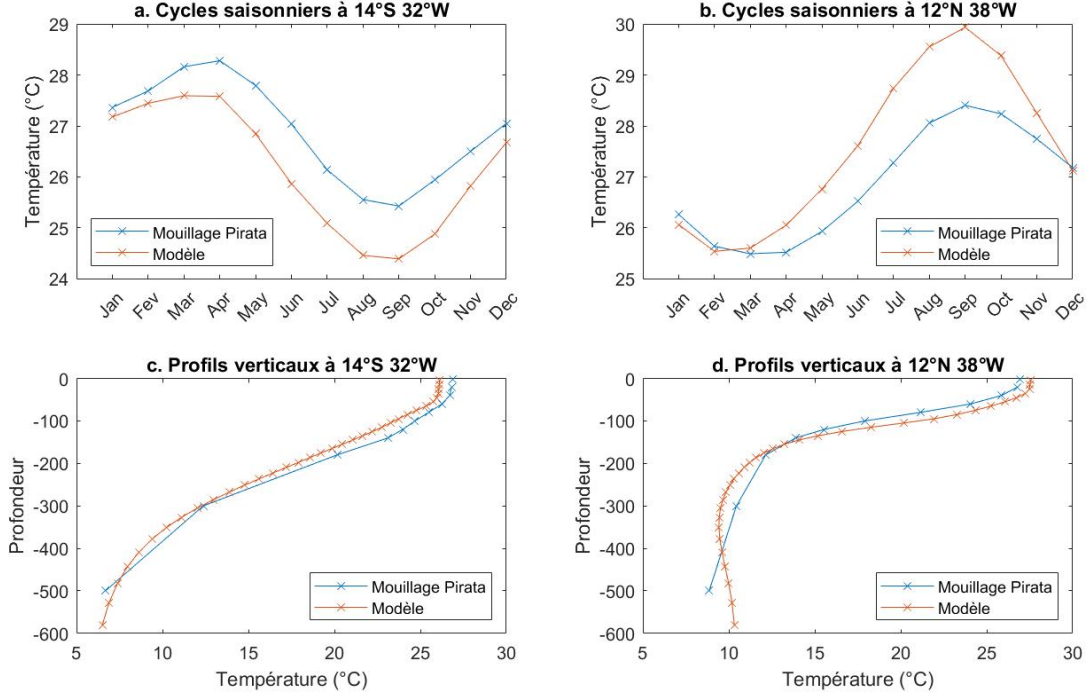


FIGURE 2 – Comparaison des cycles saisonniers et des profils verticaux du modèle HIST et des observations à 14°S 32°W (gauche) et 12°N 38°W (gauche)

Afin de valider notre utilisation du modèle, nous avons comparé les cycles saisonniers de la température de surface obtenus grâce aux données du modèle et aux observations, ainsi que les profils verticaux de la température.

L'analyse du cycle saisonnier montre une bonne capacité du modèle à retracer le cycle saisonnier. Au niveau de la bouée PIRATA au Sud de la zone (Figure 2.a), on peut voir que les extrema de températures de surface modélisées respectent bien les mesures de la bouée : on retrouve les maxima en mars-avril, et les minima en août-septembre. Pour ce qui est de la bouée au Nord de la zone (Figure 2.b), le maximum en septembre est retrouvé à la fois dans les observations et la modélisation. Le minimum arrive cependant un mois plus tôt dans le modèle, en février au lieu de mars. Cela conduit à une période d'augmentation de la température de surface d'un mois de plus dans la modélisation.

On observe également une tendance du modèle à sur- ou sous-estimer les températures. En effet, les températures de surface modélisées sont en moyenne 0.75°C au-dessous ou en dessous des températures mesurées. Cet écart se retrouve également plus en profondeur, tendance que l'on peut observer sur les profils verticaux (Figure 2.c et 2.d). Malgré ces différences, le modèle parvient à reproduire justement les variations de température avec la profondeur. Ces écarts sont d'ailleurs mentionnés dans l'article portant sur ce sujet, [Dan+12], comme étant un biais connu de la composante océanique du modèle dans cette région.

Le modèle est donc assez fidèle aux observations, en dépit de quelques divergences légères avec les observations. Son utilisation pour l'étude des température de surface est par conséquent justifiée.

3.1.2 Chlorophylle

Par la suite nous avons fait la climatologie avec les données du modèle et des observations dans la même période et dans la partie Ouest du bassin Atlantique Tropical, toujours dans l'optique de valider notre modèle.

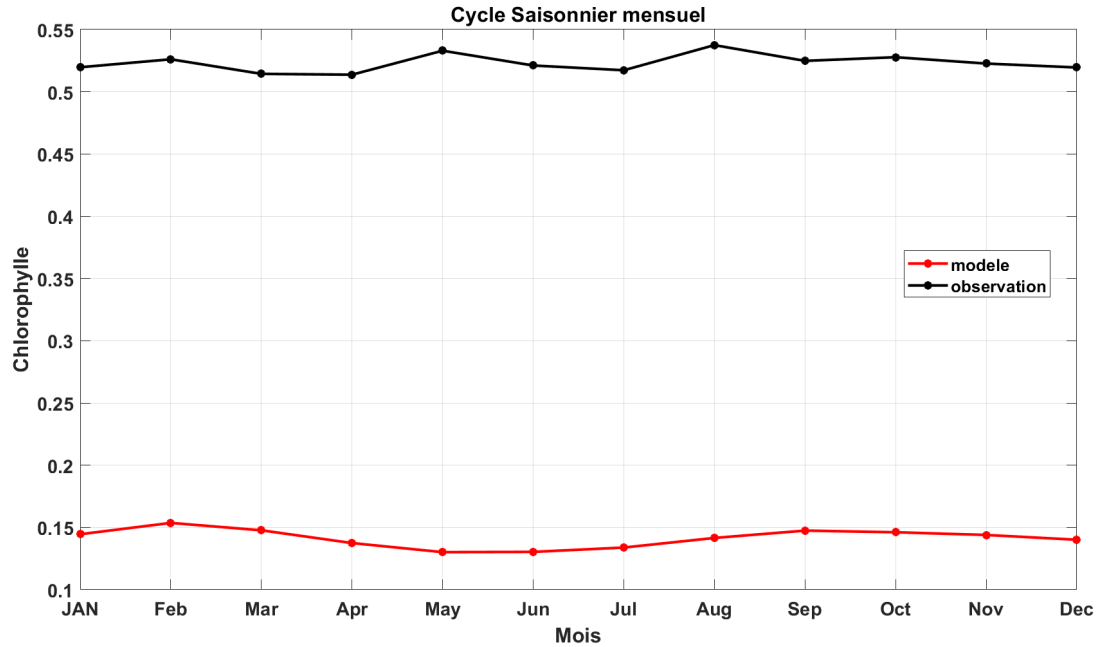


FIGURE 3 – Cycle saisonnier mensuel, 2000-2014

Les cycles saisonniers du modèle et des observations pour la période de 2000 à 2014 sont comparés dans la figure 3. Les observations et le modèle présentent une augmentation de la chlorophylle tout au long du mois de janvier, puis une diminution de février à juin pour le modèle et de février à juillet soit une avance d'un mois pour les observations. Les minima de Chlorophylles sont observés en juin par le modèle et les observations, et les maxima sont observés en Septembre par le modèle et en Aout par les observations soit un mois plus tôt dans le modèle.

Cependant, on peut observer une surestimation la Chlorophylle de 0.33 mg/m³ en moyenne, des observations par rapport aux modèles.

En somme on peut dire que notre modèle est en bon accord avec les observations, car bien qu'on observe un léger écart de chlorophylle, elle suit la même tendance que le modèle au fil des mois.

3.2 Etude des cycles saisonniers

3.2.1 Description des cycles saisonniers

La figure 4 présente les cartes illustrant les moyennes saisonnières de la température de surface (4.a) et de la chlorophylle (4.b). En examinant la Figure 4.a, on peut observer l'évolution des températures de surface au fil des saisons. En été boréal, les Alizés du Sud Est sont dominants. Ils poussent les eaux chaudes de surface vers le Nord-Ouest de l'Atlantique Tropical, entraînant par conséquent une accumulation de ces eaux chaudes dans cette région, conduisant à un downwelling au Nord de l'Équateur, et un upwelling au Sud de l'Équateur ([CKK19]). Dans le même temps, les eaux de surface sont poussées le long de l'équateur depuis l'Est du

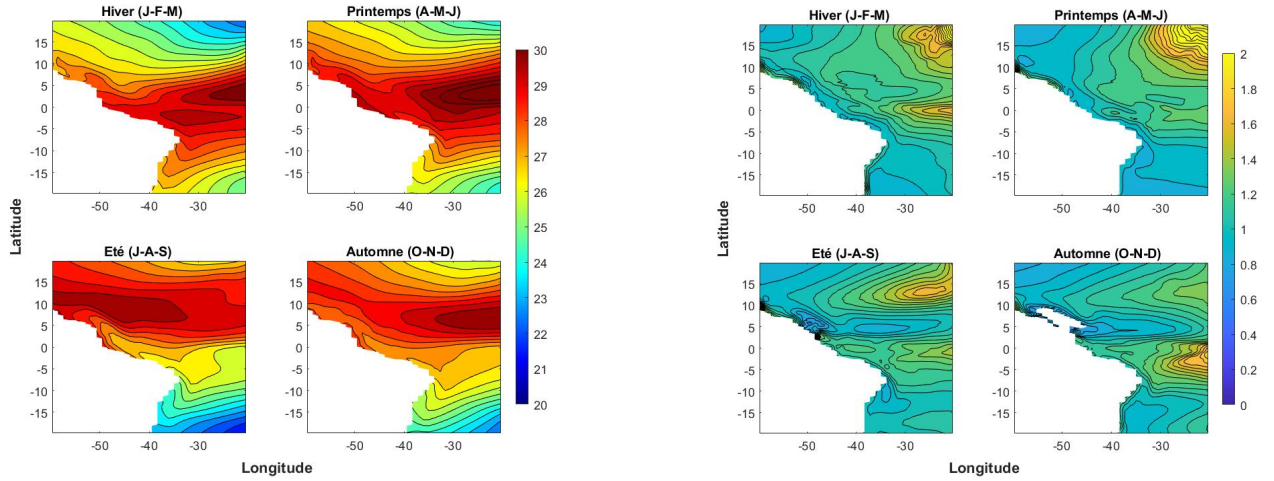


FIGURE 4 – Cartes moyennes saisonnières de a. la température de surface, b. la chlorophylle, calculées entre 2000 et 2014 via le modèle historique

bassin Atlantique Tropical, résultant en une élévation de la thermocline au niveau des côtes africaines, et une descente de la thermocline au niveau des côtes brésiliennes. Cette configuration est clairement visible sur la figure d’été boréal, où l’on voit les eaux chaudes au nord du Brésil, et des eaux plus froides en dessous de l’équateur. En automne, les alizés du SE perdent en intensité, permettant aux eaux chaudes de redescendre vers l’Équateur, et à la thermocline de remonter à l’Ouest de l’Atlantique, et de redescendre à l’Est. Les alizés du Nord-Est prennent ensuite le relais en hiver, et poussent les eaux chaudes au niveau de l’Équateur, leur position la plus au Sud de l’année. Au printemps, les vents du Sud Est reprennent, et les eaux chaudes remontent petit à petit vers le Nord.

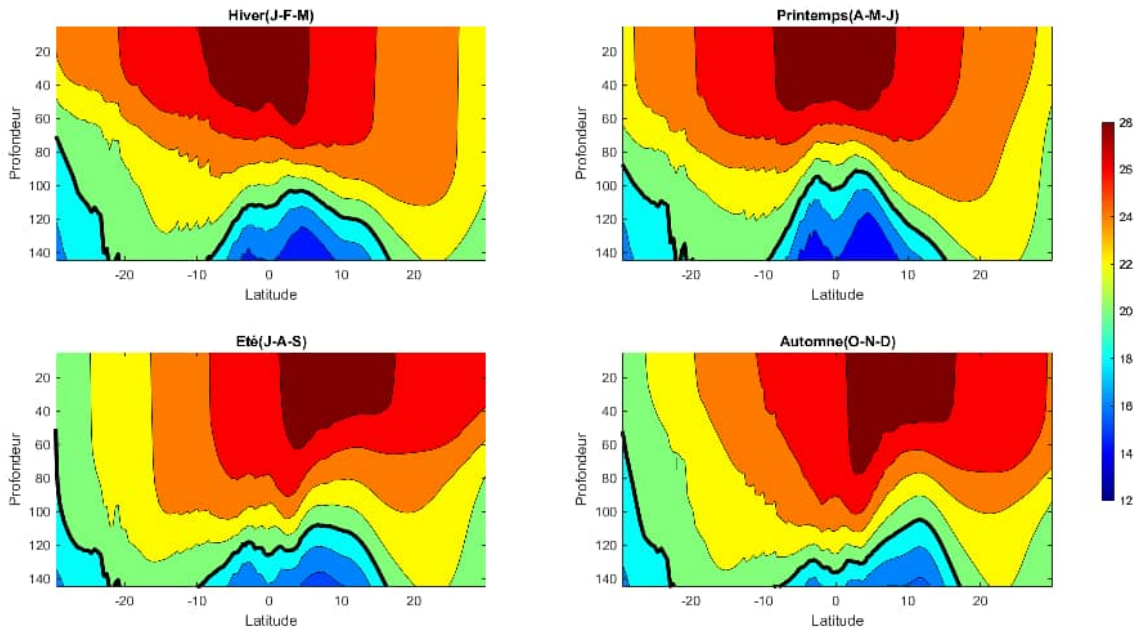


FIGURE 5 – Thermocline (m) sur la partie ouest du Brésil, 2000 -2014

En ce qui concerne la chlorophylle, une concentration importante est observée pendant l’hiver et le printemps boréal au niveau de l’upwelling de Mauritanie. Cela est attribuable à la remontée des eaux profondes riches en nutriments, favorisant ainsi une production primaire

plus intense ([Fay+15]). On note également un pic de concentration en automne et en hiver boréal, venant de l'est, au niveau de l'équateur et jusqu'à environ 35°W. Il est plausible que cette chlorophylle soit transportée via le Courant Équatorial Sud, qui circule d'est en ouest au niveau de l'équateur, apportant des eaux du Golfe de Guinée, plus ou moins riches en production primaire selon la période de l'année. Les zones de plus faibles concentrations sont situées au niveau de l'embouchure de l'Amazone.

Dans l'optique d'approfondir notre curiosité mais aussi en voulant voir l'application de nos cours d'Océanographie physique nous sommes allées plus loin en regardant la variation de la thermocline dans notre zone d'étude. Cette variation est représentée par les figures 5. En effet, comme vu dans nos cours, pendant la période d'upwelling on note une remontée de la thermocline au niveau des côtes, et un affaissement de celle-ci au large et ceci est bien visible sur la carte où on a la profondeur de la thermocline comprise entre 24 et 28m durant cette période et que cette profondeur diminue au fur et à mesure qu'on s'approche de la saison chaude (non-upwelling) où cette tendance disparaît ; la profondeur de la thermocline ne dépasse pas 20m maximum.

3.2.2 Zones de variabilité de la température des surface et des phytoplanctons

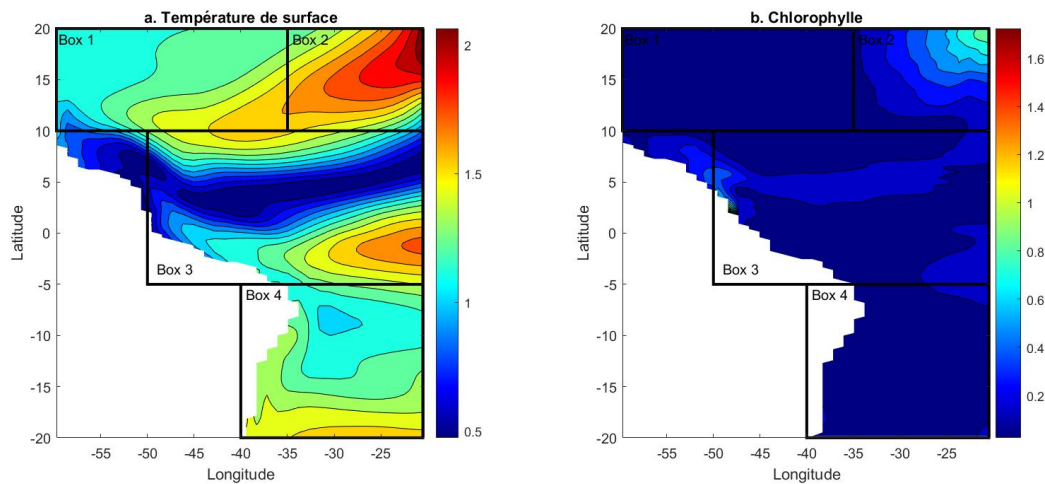


FIGURE 6 – Écart-types de a. la Température de surface, b. la chlorophylle (calculés entre 2000 et 2014 via le modèle HIST)

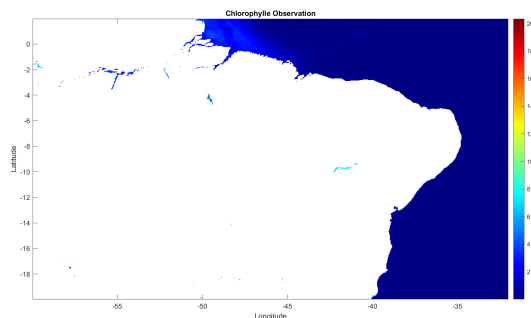


FIGURE 7 – Carte des écart-types des observations de chlorophylle (ml/g)

dans laquelle se balade la bande de température de surface maximale au fil de l'année.

Afin de pouvoir choisir une boîte d'étude plus précise pour la suite de nos travaux, nous avons étudié les variabilités de la température de surface et de la chlorophylle. Les résultats sont visibles en Figure 6.

Dans le cas de la température de surface, la zone de variabilité maximale se trouve au Nord-Est de la zone d'étude, dans une région située au large de l'Afrique de l'Ouest. Cette région est affectée par un upwelling de bord Est, ce qui peut expliquer en partie sa forte variabilité ([Fay+15]). On voit également une bande de variabilité minimale, entre l'Équateur et 10°N, ce qui correspond à la région

Au niveau des bouées PIRATA utilisées pour la validation du modèle, on trouve des écart-types de 1.17°C pour la bouée nord et 1.02°C pour la bouée sud. Dans le modèle, ces points ont des écart-types de 1.60°C et 1.28°C respectivement. Les valeurs obtenus grâce au modèle sont assez proches de celle mesurées sur place, avec un écart moyen de 0.35°C.

En ce qui concerne la figure 7, on peut remarquer qu'elle donne les zones de forte variabilité près de la côte Brésilienne entre 4°S et 2°N, où les valeurs vont jusqu'à 8 mg/m³, et ce au-delà même de 2°N.

La région de variabilité maximale de la chlorophylle se situe au niveau de l'embouchure de l'Amazone, caractérisée par des eaux riches en nutriments propices au développement de divers phytoplanctons, stimulant ainsi la production primaire ([Goe+14], [LMG23], [Goe+10], [Hin+12]). Le débit du fleuve connaît des variations saisonnières, avec une crue de mars à juillet, entraînant des fluctuations dans l'apport en nutriments au fil des saisons. Ces variations saisonnières expliquent les valeurs élevées des écarts types de la chlorophylle dans cette zone. Une autre zone de variabilité se trouve au nord-est de cette région, correspondant à l'upwelling de Mauritanie. Dans cette zone également, d'importantes variations dans la production primaire sont observées en fonction de la période de l'année.

La division en boîtes a été faite en s'inspirant de [Nog+18], qui étudie les causes des variabilités saisonnières et interannuelles de la température de surface dans l'Ouest de l'Atlantique Tropicale. Ces boîtes ont été choisies en fonction de la variabilité de la température de surface, du flux thermique net moyen de surface et de la distribution moyenne des courants zonaux. Le reste de notre étude portera sur la boîte n°3, limitée par les longitudes -50°W et -20°W et par les latitudes 10°N et 5°S. Cette zone a été sélectionnée car, englobant les latitudes de variations de la ZITC, et l'embouchure de l'Amazone, il nous a semblé intéressant d'y étudier les impacts du changement climatique.

3.2.3 Impacts du changement climatique

Nous nous sommes intéressés à l'étude des moyennes annuelles de la température de surface et de la chlorophylle sur la période allant de 2000 à 2069, dans le but d'évaluer les tendances associées à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 8. En ce qui concerne la température de surface, une tendance claire à l'augmentation est observée. La moyenne sur 15 ans du modèle HIST, entre 2000 et 2014, s'élève à 28.65°C. En revanche, la moyenne sur 20 ans du modèle RCP, de 2050 à 2069, dépasse déjà les 30.72°C, marquant une augmentation d'environ 2°C par rapport au début du siècle. Il est important de noter que cette moyenne sur 20 ans masque une augmentation continue des températures de surface au sein même du modèle RCP, avec des températures en 2069 déjà environ 0.5°C plus élevées qu'en 2050.

Contrairement à la tendance à l'augmentation observée pour la température de surface, la chlorophylle semble présenter une diminution au fil du temps. Entre 2000 et 2014, la moyenne annuelle de la chlorophylle était de 1.14 mg/m³, tandis qu'entre 2050 et 2069, cette moyenne diminue légèrement pour atteindre 1.09 mg/m³.

Nous avons par la suite étudié les cycles saisonniers aux trois périodes distinctes afin de mieux comprendre les conséquences du changement climatique au sein même d'une année.

Les cycles saisonniers de chaque modèle sont visibles en figure 9. La courbe du modèle HIST de la température présente les caractéristiques typiques d'un climat équatorial : une première saison chaude au printemps boréal, au moment où les alizés sont les plus faibles et où les eaux chaudes de surface ne sont plus repoussées vers l'Équateur ou le Nord. Elles sont alors entre 10°N et 0°, donc dans la boîte étudiée. En été boréal, les vents conduisent les eaux de surface vers le Nord et entraînent un upwelling au sud de l'Équateur. La zone est donc séparée par des eaux froides au Sud et des eaux chaudes au Nord, et on a une baisse de la température de surface.

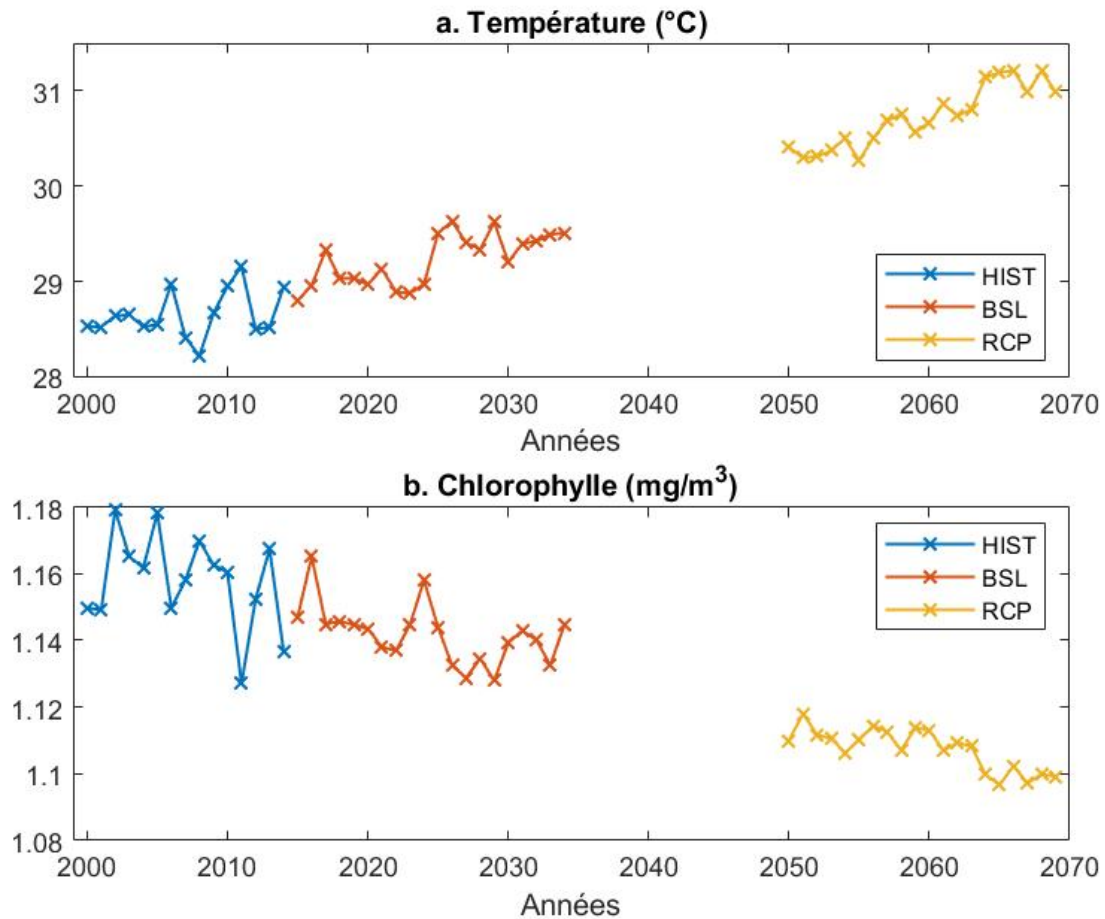


FIGURE 8 – Moyennes annuelles des températures de surface et de chlorophylle d’après les modèles historique, BSL et RCP

En automne, les vents se calment et les eaux chaudes peuvent redescendre vers l’Équateur. La température augmente de nouveau. Le cycle saisonnier de la SST du modèle BSL, mis à part une augmentation des moyennes mensuelles, est similaire à celui de HIST : les extrema sont retrouvés aux mêmes périodes, les phases d’augmentation ou de diminution de la température sont de durées comparables. Le cycle saisonnier de RCP, s’il présente des variations semblables, est quant à lui décalé d’un mois : le pic de température de surface survient en Mai-Juin, au lieu d’Avril-Mai, le minimum en Septembre-Octobre au lieu d’Août-Septembre. Ainsi, il semble que les saisons chaudes et pluvieuses soient en déphasage d’en moyenne un mois entre 2050 et 2070 par rapport à 2000-2034.

En ce qui concerne la chlorophylle, le modèle HIST montre des variations relativement faibles, avec une période d’augmentation entre août et février, suivie d’une diminution jusqu’à septembre. Les valeurs restent cependant dans une plage étroite, entre 1.12 mg/m³ et 1.24 mg/m³. De manière similaire à la température, le modèle BSL suit les mêmes variations que le modèle HIST aux mêmes périodes, tandis que le modèle RCP présente un décalage d’un mois. On peut également noter que, bien que suivant la même tendance saisonnière, les valeurs de concentrations de chlorophylle de RCP sont cependant plus faibles, comprises entre 1.08 mg/m³ et 1.2 mg/m³.

La chlorophylle observée ici résulte de la somme des contributions des diazotrophes, des diatomées et du petit phytoplancton. Ainsi, les cycles saisonniers de chacun de ces types de phytoplanctons ont été examinés pour chaque modèle afin de déterminer leur contribution potentielle au cycle saisonnier de la chlorophylle. Les résultats sont visibles en figure 10.

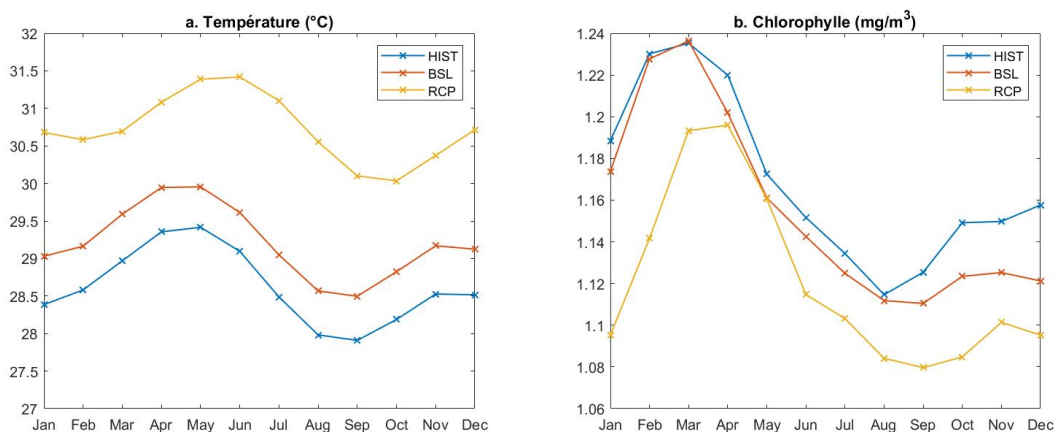


FIGURE 9 – Cycles saisonniers de a. le température de surface, b. la chlorophylle, d’après chaque modèle

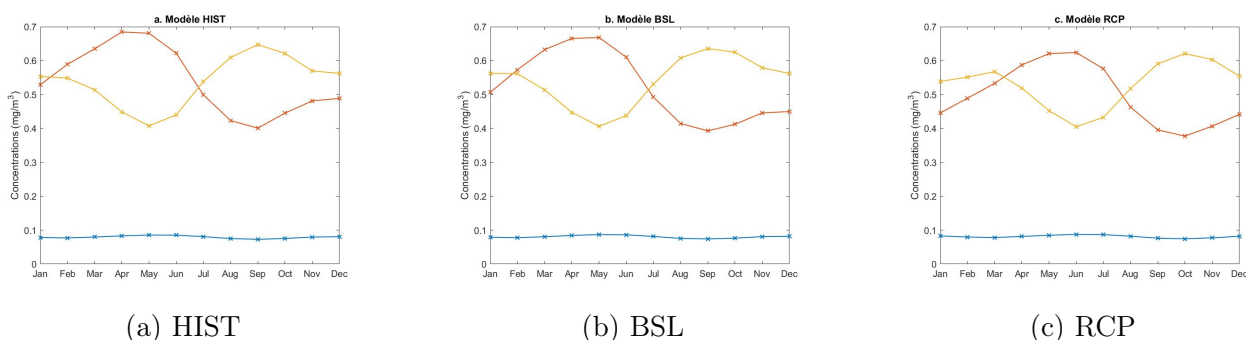


FIGURE 10 – Cycles saisonniers des contributions à la chlorophylle des diazotrophes (bleu), diatomés (rouge) et petit phytoplancton (jaune) selon les 3 modèles.

On constate que les diazotrophes ont une influence négligeable sur le cycle saisonnier de la chlorophylle, avec une concentration maintenue autour de $0,1 \text{ mg/m}^3$ tout au long de l’année. Cependant, les variations annuelles des diazotrophes et du petit phytoplancton contribuent à expliquer les faibles amplitudes des variations annuelles totales de la chlorophylle. Ces deux cycles semblent être inversement corrélés, montrant une diminution des diatomées lorsque la concentration de petit phytoplancton augmente, et vice versa. En conséquence, les deux contributions s’annulent en grande partie, ce qui donne une courbe de chlorophylle totale relativement lisse lorsque les concentrations sont additionnées, ainsi que vu précédemment.

En ce qui concerne l’évolution entre 2000 et 2069, on constate une diminution très marginale du petit phytoplancton entre les modèle HIST et RCP. La concentration moyenne pour HIST est de $0,60 \text{ mg/m}^3$, légèrement réduite à $0,59 \text{ mg/m}^3$ pour RCP. Pour les diatomées, la concentration passe de $0,44 \text{ mg/m}^3$ à $0,41 \text{ mg/m}^3$, une réduction toujours légère mais suffisante pour expliquer la diminution sur le cycle saisonnier de la chlorophylle totale de RCP, illustrée en Figure 9.b. Dans le cas des diazotrophes, on observe une augmentation de la concentration moyenne de $0,088 \text{ mg/m}^3$ à $0,090 \text{ mg/m}^3$, une augmentation trop faible pour avoir un impact significatif sur le cycle saisonnier de la chlorophylle totale.

4 Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l’impact du changement climatique sur les cycles saisonniers de la température de surface et de la chlorophylle dans l’Ouest de l’Atlantique Tropicale, en concentrant nos recherches sur une boîte équatoriale délimitée par les latitudes 10°N et 5°S, et par les longitudes 50°W et 20°W.

La première observation de notre étude est l’augmentation nette de la température de surface au fil des années. Les modèles montrent clairement une tendance à la hausse, avec une augmentation d’environ 2°C entre la période de référence 2000-2014 et la période de scénario RCP 2050-2069. Cette élévation significative, stimulée par les émissions accrues de gaz à effet de serre, pourrait influencer de manière notable des paramètres atmosphériques tels que les vents, la Zone Intertropicale de Convergence et, par conséquent, la circulation de Hadley ([Ser+14], [CKK19]), engendrant ainsi des répercussions sur le climat global.

En parallèle, les modèles indiquent également une faible diminution des concentrations de diatomées et de petit phytoplancton. Ces diminutions entrent en contradiction avec des recherches antérieures ([Mor+10], [Hin+12]), qui indiquent une augmentation des concentrations de ces types de phytoplancton avec la température. Nous n’étudions ici que la température, et la croissance des phytoplanctons dépend de bien d’autres paramètres, comme l’ensoleillement, les nutriments, la profondeur de la couche de mélange, etc. La zone d’étude est également située au niveau de l’embouchure de l’Amazone, et l’impact du changement climatique sur ce fleuve et ses décharges n’a pas été étudié. Il est possible que d’autres paramètres, qui n’ont pas été pris en compte ici, puissent expliquer ces variations de concentrations.

On remarque de plus un décalage dans les cycles saisonniers de chaque variable dans le modèle RCP, ceux-ci arrivant un mois plus tard que la période actuelle. Les résultats de différentes études indiquent un décalage inverse dans l’arrivée des saisons sur les terres, où les saisons arriveraient 2 jours plus tôt, d’après Stine et al dans [SHF09] et [SH12]. Le même phénomène est trouvé pour les zones d’upwelling ([Wan+15]).

Dans le contexte de la région étudiée, où les côtes abritent une grande partie de la population brésilienne dépendante des ressources marines, ainsi qu’une biodiversité abondante, la compréhension de ces changements climatiques est cruciale. Les implications vont au-delà des aspects environnementaux, touchant également les activités humaines telles que la pêche, et soulignant l’importance de la prise de décision éclairée pour atténuer ces impacts.

Il serait intéressant, pour compléter cette analyse, d’y ajouter d’autres paramètres océanographiques et atmosphériques, tels que les vents, les courants, afin d’avoir une image plus globale des interactions atmosphère-océan de la région, et des conséquences

Bibliographie

- [CKK19] Lander R. CRESPO, Noel KEENLYSIDE et Shunya KOSEKI. “The Role of Sea Surface Temperature in the Atmospheric Seasonal Cycle of the Equatorial Atlantic”. In : *Climate Dynamics* 52.9-10 (mai 2019), p. 5927-5946. ISSN : 0930-7575, 1432-0894. DOI : [10.1007/s00382-018-4489-4](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4489-4). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00382-018-4489-4> (visité le 24/01/2024).
- [Dan+12] Gokhan DANABASOGLU et al. “The CCSM4 Ocean Component”. In : *Journal of Climate* 25.5 (mars 2012), p. 1361-1389. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-11-00091.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00091.1). URL : <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-11-00091.1> (visité le 17/01/2024).
- [Eur22] EUROPEAN UNION-COPERNICUS MARINE SERVICE. *Global Ocean Colour (Copernicus-GlobColour), Bio-Geo-Chemical, L4 (Monthly and Interpolated) from Satellite Observations (1997-Ongoing)*. Mercator Ocean International, 2022. DOI : [10.48670/MOI-00281](https://doi.org/10.48670/MOI-00281). URL : https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_104/INFORMATION (visité le 21/02/2024).
- [Fay+15] Saliou FAYE et al. “A Model Study of the Seasonality of Sea Surface Temperature and Circulation in the Atlantic North-eastern Tropical Upwelling System”. In : *Frontiers in Physics* 3 (15 sept. 2015). ISSN : 2296-424X. DOI : [10.3389/fphy.2015.00076](https://doi.org/10.3389/fphy.2015.00076). URL : <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fphy.2015.00076/abstract> (visité le 24/01/2024).
- [Goe+10] Nicole L. GOEBEL et al. “Abundance and Distribution of Major Groups of Diazotrophic Cyanobacteria and Their Potential Contribution to N₂ Fixation in the Tropical Atlantic Ocean”. In : *Environmental Microbiology* 12.12 (déc. 2010), p. 3272-3289. ISSN : 1462-2912, 1462-2920. DOI : [10.1111/j.1462-2920.2010.02303.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02303.x). URL : <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1462-2920.2010.02303.x> (visité le 24/01/2024).
- [Goe+14] Joaquim I. GOES et al. “Influence of the Amazon River Discharge on the Biogeography of Phytoplankton Communities in the Western Tropical North Atlantic”. In : *Progress in Oceanography* 120 (jan. 2014), p. 29-40. ISSN : 00796611. DOI : [10.1016/j.pocean.2013.07.010](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.07.010). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079661113001237> (visité le 21/01/2024).
- [Hin+12] Stephanie L. HINDER et al. “Changes in Marine Dinoflagellate and Diatom Abundance under Climate Change”. In : *Nature Climate Change* 2.4 (avr. 2012), p. 271-275. ISSN : 1758-678X, 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate1388](https://doi.org/10.1038/nclimate1388). URL : <https://www.nature.com/articles/nclimate1388> (visité le 25/01/2024).
- [LMG23] Domitille LOUCHARD, Matthias MÜNNICH et Nicolas GRUBER. “On the Role of the Amazon River for N₂ Fixation in the Western Tropical Atlantic”. In : (fév. 2023), 22 p. DOI : [10.3929/ETHZ-B-000601512](https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000601512). URL : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/601512> (visité le 24/01/2024).
- [Mor+10] Xosé Anxelu G. MORÁN et al. “Increasing Importance of Small Phytoplankton in a Warmer Ocean”. In : *Global Change Biology* 16.3 (mars 2010), p. 1137-1144. ISSN : 1354-1013, 1365-2486. DOI : [10.1111/j.1365-2486.2009.01960.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01960.x). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2009.01960.x> (visité le 24/01/2024).

- [Nog+18] A. V. NOGUEIRA NETO et al. “Seasonal and Interannual Mixed-Layer Heat Budget Variability in the Western Tropical Atlantic From Argo Floats (2007–2012)”. In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 123.8 (août 2018), p. 5298-5322. ISSN : 2169-9275, 2169-9291. DOI : [10.1029/2017JC013436](https://doi.org/10.1029/2017JC013436). URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2017JC013436> (visité le 17/01/2024).
- [Ser+14] Jacques SERVAIN et al. “Recent Climatic Trends in the Tropical Atlantic”. In : *Climate Dynamics* 43.11 (déc. 2014), p. 3071-3089. ISSN : 0930-7575, 1432-0894. DOI : [10.1007/s00382-014-2168-7](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2168-7). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00382-014-2168-7> (visité le 31/01/2024).
- [SHF09] A. R. STINE, P. HUYBERS et I. Y. FUNG. “Changes in the Phase of the Annual Cycle of Surface Temperature”. In : *Nature* 457.7228 (jan. 2009), p. 435-440. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/nature07675](https://doi.org/10.1038/nature07675). URL : <https://www.nature.com/articles/nature07675> (visité le 21/02/2024).
- [SH12] Alexander R. STINE et Peter HUYBERS. “Changes in the Seasonal Cycle of Temperature and Atmospheric Circulation”. In : *Journal of Climate* 25.21 (nov. 2012), p. 7362-7380. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-11-00470.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00470.1). URL : <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-11-00470.1> (visité le 21/02/2024).
- [Til+18] Simone TILMES et al. “CESM1(WACCM) Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble Project”. In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 99.11 (nov. 2018), p. 2361-2371. ISSN : 0003-0007, 1520-0477. DOI : [10.1175/BAMS-D-17-0267.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0267.1). URL : <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/99/11/bams-d-17-0267.1.xml> (visité le 17/01/2024).
- [Wan+15] Daiwei WANG et al. “Intensification and Spatial Homogenization of Coastal Upwelling under Climate Change”. In : *Nature* 518.7539 (fév. 2015), p. 390-394. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/nature14235](https://doi.org/10.1038/nature14235). URL : <https://www.nature.com/articles/nature14235> (visité le 21/02/2024).