

# Université Assane Seck de Ziguinchor



## UFR Sciences et Technologies Département de Physique

### Mémoire de Master Physique et Applications

**Spécialité** : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Thème :

# CARACTERISATION DES VAGUES DE CHALEUR MARINE DANS L'ATLANTIQUE TROPICAL ORIENTAL

Présenté par :

**Raoul SYLVA**

Sous la direction de :

**Pr Samo DIATTA**

Soutenu publiquement le : 19 Avril 2025

Devant le jury composé de :

M. Mamadou Lamine MBAYE	Professeur Assimilé	Président	UASZ
M. Habib Boubacar DIENG	Maitre de Conférence Titulaire	Rapporteur	UASZ
M. Bamol Ali SOW	Professeur Assimilé	Examineur	UASZ
M. Samo DIATTA	Professeur Assimilé	Encadreur	UASZ

## Dédicace

*À mes très chers parents,*

*Votre amour, votre patience et vos sacrifices ont été la clé de mon parcours. Vous m'avez appris la valeur du travail, de la persévérance et du respect. Ce mémoire est le fruit de vos encouragements et de votre bienveillance.*

*À ma chère épouse (Néné GOMIS),*

*Ta présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation et de réconfort. Merci pour ton amour, ton soutien sans faille et ta patience durant cette aventure. Ce travail est aussi le tien.*

*À mes frères et sœurs,*

*Votre soutien, vos encouragements et votre confiance en moi ont été d'une grande importance. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir soutenu dans chaque étape de mon parcours.*

*Que ce mémoire soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon amour pour vous tous.*

## Remerciement

Avant tout, je tiens à remercier l'Éternel Dieu Tout-Puissant, source de ma lumière et de mon salut. C'est grâce à Sa grâce infinie et à Sa guidance que j'ai pu mener à bien ce mémoire. Il m'a accompagné dans les moments de doute, éclairé mon chemin et fortifié.

Je Lui rend gloire pour tous les projets déjà réalisés et pour ceux à venir, dans l'espoir qu'Il continue de me guider et de m'inspirer

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de recherche.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de recherche, **Pr Samo DIATTA**, pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Son expertise et ses encouragements ont été essentiels pour mener à bien ce projet.

Je remercie également l'ensemble des membres du comité de lecture présidé par Dr. Mamadou Lamine MBAYE, pour leurs remarques pertinentes et constructives qui ont grandement enrichi ce mémoire. Merci une fois de plus à vous enseignant chercheur qui avez su répondre à mes attentes dans les moments où j'ai besoin de vous : Dr. Mamadou Lamine MBAYE, Dr. Habib Boubacar DIENG, Pr. Bamol Ali SOW ...

Un merci spécial à tous les doctorants, Post doctorant et mastérants du laboratoire LOSEC et toutes les personnes qui m'ont toujours motivé en particulier à Pape Mar Sène, Souleymane Thiam, Mamadou Ndong, Issa Ba et Massara Diakhaté pour leurs discussions stimulantes, leur aide précieuse et leur soutien moral sur tout quand j'avais quitté l'université pour des raisons personnelles, ils ne cessaient de me dire de continuer les études universitaires.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à ma femme pour sa compréhension envers moi, les moments où je n'avais pas le temps pour discuter.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien inébranlable, leur patience et leur amour tout au long de cette aventure académique. Leur présence à mes côtés m'a permis de surmonter les moments difficiles et de me concentrer sur l'achèvement de ce mémoire.

Papa, Maman et Dinisse mon grand frère bien aimé, je vous dis un grand merci.

## Résumé

Le réchauffement climatique devient de plus en plus important en termes d'intensité, de fréquence et de durée dans certaines zones océanique et en particulier dans l'océan atlantique tropical oriental (notre zone d'étude). Ce phénomène connu sous le nom de vague de chaleur marine (VCM) ou canicule marine a entraîné de nombreux dégâts tant dans le domaine économique que social (Gao, Z et al., 2023). C'est un évènement prolongé d'eau chaude qui dure au moins cinq jours consécutifs pendant lesquels la température dépasse un certain seuil noté  $T_{90}$  (température au-delà de laquelle certains animaux dans l'océan comme les coraux subissent un stress thermique).

Dans ce travail, les caractéristiques des vagues de chaleur marine ont été étudiées sur l'océan atlantique tropical oriental en fonction de leur variation interannuelle et intra-saisonnière, de leur tendance temporelle et de leur répartition spatiale. En l'occurrence, nous avons utilisé trois types de données que sont : les données OISST, les données ERA5 et les données de GEBCO-2024 nous permettant d'avoir respectivement la température de la surface de la mer et donc les caractéristiques des VCM, les flux de chaleur latente et sensible qu'échangent l'océan et l'atmosphère et la bathymétrie de la mer dans notre zone d'étude (l'océan atlantique tropical oriental) sur une période de 38 ans allant de 1982 à 2019.

Les résultats sur les variations interannuelles des caractéristiques des VCM montrent que leurs durées, leurs intensités cumulées et leurs intensités maximales suivent des phases légères de croissance et décroissance entre 1982 et 1997, une phase relativement stable entre 1997 et 2013, puis une phase d'augmentation rapide et significative à partir de 2013 notée pour la durée et l'intensité cumulée, et une augmentation progressive et non significative pour l'intensité maximale. Concernant l'intensité moyenne, les données révèlent des périodes de fluctuations avec des pics marqués en 1987, 2007 et 2014.

Quant aux variations intra-saisonnières les résultats montrent que les VCM sont plus intenses en hiver.

Nos résultats ont montré également que la tendance temporelle et la répartition spatiale des caractéristiques des VCM telles que leur durée, leur intensité cumulée et leur intensité maximale ont des valeurs plus importantes vers le Nord et plus remarquées vers les côtes de l'Afrique de l'ouest. Tandis que leur intensité moyenne a des valeurs plus importantes dans les régions centrales et certaines vers le sud-ouest.

Quant à la fréquence et probabilité d'apparition des VCM, notre zone d'étude est fortement affectée par des VCM de catégorie faible et rarement par celles de catégorie modérée, forte ou extrême.

**Mots clés :** vagues de chaleur marine, Océan atlantique tropical oriental, intensités des vagues de chaleur marine, durée des vagues de chaleur marine, probabilité d'apparition des vagues de chaleur marine.

## Abstract

Global warming is becoming increasingly significant in terms of intensity, frequency, and duration in certain oceanic regions, particularly in the eastern tropical Atlantic Ocean (our study area). This phenomenon, known as a marine heatwave (MHW), has caused considerable damage both economically and socially (Gao, Z et al., 2023). It refers to a prolonged event of elevated sea temperatures lasting at least five consecutive days, during which the temperature exceeds a specific threshold, denoted  $T_{90}$  (the temperature above which certain ocean animals, such as corals, experience thermal stress).

In this work, the characteristics of marine heatwaves were studied in the eastern tropical Atlantic Ocean based on their interannual and intra-seasonal variations, temporal trends, and spatial distribution. Specifically, we used three types of data : OISST data, ERA5 data, and GEBCO-2024 data. These respectively provide sea surface temperature data (and thus the MHW characteristics), latent and sensible heat fluxes exchanged between the ocean and the atmosphere, and sea bathymetry for our study area over a 38-year period from 1982 to 2019.

The results on the interannual variations in MHW characteristics show that their durations, cumulative intensities, and maximum intensities followed slight phases of growth and decline between 1982 and 1997, a relatively stable phase between 1997 and 2013, and then a rapid and significant increase from 2013 onwards for duration and cumulative intensity, and a gradual, non-significant increase for maximum intensity. Regarding average intensity, the data reveal periods of fluctuation with marked peaks in 1987, 2007, and 2014.

As for intra-seasonal variations, the results show that MHWs are more intense in winter.

Our findings also showed that the temporal trend and spatial distribution of MHW characteristics such as their durations, cumulative intensities, and maximum intensities have higher values toward the north and are more prominent along the West African coast. In contrast, their average intensities are higher in central regions and some southwestern areas.

Regarding the frequency and likelihood of MHW occurrence, our study area is heavily affected by low-category MHWs and rarely by moderate, strong, or extreme categories.

**Keywords :** marine heatwaves, eastern tropical Atlantic Ocean, marine heatwave intensity, marine heatwave duration, probability of marine heatwave occurrence.

# Table des matières

Dédicace .....	ii
Remerciement .....	iii
Résumé .....	iv
Abstract.....	vii
Liste des abréviations.....	ixx
Liste des figures.....	x
Introduction .....	1
Chapitre1 : Généralité sur le changement climatique et les vagues de chaleur marine.....	3
1. Changement climatique.....	3
1.1 Définition et problématique du changement climatique .....	6
1.2 Effets du changement climatique sur la température de l'eau de mer.....	7
1.3 Conséquences du changement climatique .....	9
2. Les Vagues de chaleur marine.....	10
2.1 Définitions d'une vague de chaleur marine .....	11
2.2 Impacts des vagues de chaleur marine dans l'écosystème marin .....	13
2.3 Impacts des vagues de chaleur marine dans l'environnement humain .....	14
2.4 Impacts des vagues de chaleur marine sur le climat.....	16
3. Méthodes prises pour minimiser les vagues de chaleur marine. ....	17
Chapitre2 : Méthodologie du mémoire.....	19
1. Présentation de la zone d'étude .....	19
2. Données utilisées.....	20
3. Méthode.....	20
3.1. Caractéristiques des vagues de chaleur marines :.....	21
3.2. Catégories des vagues de chaleur marine .....	22
3.2.1 Méthode de calcul des catégories de vagues de chaleur marine .....	23
3.2.2 Probabilité d'apparition des catégories de VCM.....	23
Chapitre3 : Résultats et discussions .....	25
3.1 Variations interannuelles des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur une période de 1982- 2019.....	25
3.1.1 Variation interannuelle de la durée moyenne des vagues de chaleur marine.....	25
3.1.2 Variation interannuelle de l'intensité cumulée moyenne, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine. ....	27
3.1.3 Variation interannuelle de la moyenne du taux d'apparition et déclin des vagues de chaleur marine .....	30
3.2 Variation intra-saisonnière des vagues de chaleur marine de 1982 - 2019.....	32

3.2.1	Variation intra-saisonnière en hiver (novembre - avril) .....	32
3.2.2	Variation intra-saisonnière en été (mai - octobre) .....	33
3.3	Tendance des variations temporelles des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019 .....	35
3.3.1	Tendance des variations temporelles de la durée des vagues de chaleur marine .....	35
3.3.2	Tendance des variations temporelles de l'intensité cumulée, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale des vagues de chaleur marine. ....	36
3.4	Répartition spatiale des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....	39
3.4.1	Répartition spatiale de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019. ....	39
3.4.2	Répartition spatiale de l'intensité cumulée moyenne, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019. ....	40
3.5	Bathymétrie de la mer et répartition spatiale de la chaleur latente et sensible dans la zone spécifiée.....	43
3.5.1	Bathymétrie de la mer dans cette zone d'étude.....	43
3.5.2	Répartition spatiale de la chaleur latente et sensible dans cette zone spécifiée .....	44
3.6	Fréquence et probabilité d'apparition des vagues de chaleur marine dans la zone d'étude.....	46
3.6.1	Fréquences des catégories de VCM dans la zone d'étude sur une période de 1982-2019.....	46
3.6.2	Probabilités d'apparition des catégories de VCM dans la zone d'étude sur une période de 1982-2019.....	47
	Conclusion et Perspective.....	49
	Bibliographie.....	50

## Liste des abréviations

VCM : Vague de Chaleur Marine

SCS : Mer de chine Méridionale

UTCATF : Utilisation des Terres, Changement d’Affectation des Terres et Foresterie

GIEC : Groupe d’Expert Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat

MCGAO : Modèle de Circulation Générale Atmosphère-Océan

GES : Gaz à effet de serre

SST : Sea Surface Temperature

COP : Conférence de Partie

OISST : Optimum Interpolation Sea Surface Temperature

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

NCDC : National Climatic Data Center

GEBCO-2024 : General Bathymetric Chart of the Oceans – 2024

ERA5 : Reanalysis 5th Generation

CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

$T_m$  : moyenne climatologie

$T_{90}$  : température seuil (température au-dessus duquel 10% des valeurs sont supérieure à la normale).

## Liste des figures

<i>Figure1. 1: Émissions mondiales de CO<sub>2</sub> issues des énergies fossiles et procédés industriels (hors UTCATF) .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure1. 2: : Évolution simulée de la température mondiale (°C) par rapport à 1850-1900 selon les scénarios SSP du modèle CMIP6 (1950–2100) (Valérian, 2022).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure1. 3: Impacts des fortes pluies d’août au Sénégal : inondations et pertes associées (Sénégal, 2022, 6 septembre) .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure1. 4: Nombre de publications par an en lien avec les vagues de chaleur marines (Grimmelpont, 2023).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure1. 5: Probabilité d’apparition des VCM : observée pour la période 1985-2014 et simulée pour la fin du XXIème siècle selon deux scénarios différents d’émissions de GES (SSP1-2.6 et SSP5-8.5) (Grimmelpont, 2023).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure1. 6: Alaria esculenta est une algue brune qui apprécie les eaux froides. En raison du réchauffement climatique son aire de répartition en Europe tend à diminuer (de Bettignies, 2019).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure1. 7: Paramètres moyens pendant 23 jours de VCM : ouverture stomatique et micro-fermetures horaires (Grimmelpont, 2023).....</i>	<i>14</i>
<i>Figure1. 8: Les vagues de chaleur marines affectent la vie marine et les communautés humaines (Platform, 2024).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure2. 1: Atlantique tropical Oriental.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure3. 1: Variation interannuelle de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure3. 2: Variation interannuelle de l’intensité cumulée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure3. 3: Variation interannuelle de l’intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure3. 4: Variation interannuelle de l’intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>28</i>

<i>Figure3. 5: Variation interannuelle de la moyenne du taux d'apparition des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure3. 6: Variation interannuelle de la moyenne du taux de déclin des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure3. 7: Variation intra-saisonnière des caractéristiques des VCM en hiver sur la période allant de 1982 à 2019.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure3. 8: Variation intra-saisonnière des caractéristiques des VCM en été sur la période allant de 1982 à 2019.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure3. 9: Tendance des variations temporelles de la durée des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure3. 10: Tendance des variations temporelles de l'intensité cumulée des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure3. 11: Tendance des variations temporelles de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure3. 12: Tendance des variations temporelles de l'intensité maximale des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure3. 13: Répartition spatiale de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure3. 14: Répartition spatiale de l'intensité cumulée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure3. 15: Répartition spatiale de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure3. 16: Répartition spatiale de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....</i>	<i>41</i>

*Figure3. 17: Elévation de la mer dans l'océan atlantique plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes allant de -40° à -14° et des latitudes allant de 5° à 25° .....43*

*Figure3. 18: Répartition spatiale de la chaleur latente dans l'océan atlantique plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes(x) de -40° à -14° et des latitudes(y) allant de 5° à 25° .....44*

*Figure3. 19: Répartition spatiale de la chaleur sensible dans l'océan atlantique plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes(x) de -40° à -14° et des latitudes(y) allant de 5° à 25° .....45*

*Figure3. 20: Fréquence des catégories de vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....46*

*Figure3. 21: Probabilité des catégories de vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.....47*

## Introduction

Agissant dans de nombreux domaines tels que les écosystèmes, les ressources, l'agriculture et l'élevage, en maintenant les conditions de vie stables des êtres qui vivent sur terre, le climat joue un rôle crucial. Ainsi, sa variation dépend de ses paramètres tels que la température, les précipitations, certains phénomènes océaniques comme les courants, qui lorsqu'ils changent, provoquent un changement profond à l'échelle locale voire même globale. Donc le climat influence sur l'instabilité de la planète par son changement causant des sécheresses sévères ou par fois des inondations.

De ce fait de nombreuses études ont été faites pour maintenir un bon climat sur terre. Après la prise de conscience des enjeux économiques immédiats de la transition climatique, trois événements ont précipité un changement de perspective. Le premier a été l'Accord de Paris en fin 2015, qui a fixé un cadre et une ambition. Le deuxième a été l'accord européen en 2019 qui vise une économie neutre en carbone en 2050, et réduit dès 2030 les émissions de gaz à effet de serre de 55 %, par rapport à l'année de référence 1990. Cette accélération soudaine a fait entrer la question climatique dans l'horizon des macroéconomistes. Le troisième événement a été la promulgation, à l'été 2022, de l'Inflation Reduction Act américain (Pisani, J et al., 2023).

Les activités humaines depuis le début de l'ère industrielle ont augmenté les concentrations des gaz à effet de serre ; devant ce forçage externe le système climatique se rééquilibre en changeant sa température. Cette température d'équilibre est amplifiée ou atténuée par des rétroactions complexes positives ou négatives (Matari, 2016). En effet, une hausse des températures peut provoquer des événements extrêmes en particulier des vagues de chaleur marine, des sécheresses ou des inondations, menaçant ainsi l'équilibre du système Homme-Climat-Planète Terre. Parmi ces événements causés par le changement climatique, nous allons mettre l'accent sur les vagues de chaleur marine. Les vagues de chaleur marine sont définies comme des périodes pendant lesquelles la température de surface de la mer reste anormalement élevée pendant au moins cinq jours consécutifs, dépassant le 90<sup>e</sup> percentile d'une période climatologique de référence (Hobday et al., 2016). Entre 1925–1954 et 1987–2016, la fréquence mondiale des VCM a augmenté de 34 % et leur durée moyenne de 17 %, entraînant une hausse de 54 % du nombre annuel de jours de VCM (Oliver, E. C. J et al., 2018). Ainsi la fréquence moyenne annuelle des vagues de chaleur marine (VCM) dans les mers côtières de la Chine est de 1,4 à 4,6 comptes (nombre d'événement) par an et augmente progressivement du nord au

sud. La moyenne annuelle de l'intensité moyenne, de l'intensité maximale et de l'intensité cumulée se situe respectivement dans les plages de 0,3 à 2,9 °C, 0,4 à 3,7 °C et 3,9 à 41,7 °C jours, qui montrent toutes une tendance à la baisse significative du nord au sud (Li, Z et al., 2023). Les VCM dans la mer de chine méridionale (SCS) montrent des tendances à la hausse significatives en termes de fréquence, de durée et d'intensité. Les VCM dans cette zone d'étude pendant le semestre d'été sont plus fortes que pendant le semestre d'hiver dans son ensemble, avec une probabilité plus élevée de se produire dans l'est de la SCS pendant le semestre d'été et dans la région occidentale pendant le semestre d'hiver (Gao, Z et al., 2023).

Ce travail consistera à caractériser les vagues de chaleur marine dans l'Océan Atlantique tropical Oriental. Pour ce faire, nous allons faire une étude sur les variations interannuelles et intra saisonnière des caractéristiques des vagues de chaleur marine, ensuite représenter les tendances temporelles et la répartition spatiale de ces mêmes caractéristiques des vagues de chaleur marine avant de finaliser ce travail par la fréquence et la probabilité d'apparition des catégories de vague de chaleur marine dans cette zone d'étude et ce travail est appuyé par une étude thermodynamique. Ainsi, nous allons structurer celui-ci en trois chapitres :

- Dans le chapitre1, nous allons faire une généralité sur le changement climatique et les vagues de chaleur marine.
- Le chapitre2 parle de la méthodologie utilisée, avec une description de la zone d'étude et des données utilisées.
- Le chapitre 3 est réservé aux résultats obtenus et une discussion de ceux-ci.

Enfin, ce travail se conclut par une synthèse des résultats et des perspectives pour mieux comprendre comment les vagues de chaleur marine affectent l'Atlantique tropical Oriental.

# **Chapitre1 : Généralité sur le changement climatique et les vagues de chaleur marine**

## **1. Changement climatique**

Pendant l'Holocène, l'humanité évoluait dans un contexte de réchauffement climatique post-glaciaire, marqué par une élévation progressive des températures et du niveau des mers. Grâce à ses capacités, l'Homme a appris à contrôler partiellement la photosynthèse. Cependant, malgré sa puissance, son action a eu un impact majeur sur la planète. Cet impact a conduit à l'émergence d'une nouvelle époque dans laquelle nous vivons aujourd'hui : l'Anthropocène.

L'Anthropocène est une ère géologique récente, caractérisée par l'influence dominante des activités humaines sur l'environnement terrestre, surpassant même les forces géophysiques naturelles. C'est l'âge des humains, celui d'un désordre planétaire inédit. Ce bouleversement, qui a conduit à une hausse notable des températures, trouve ses origines dans la Révolution industrielle. C'est dans ce contexte que, lors d'une réunion organisée sous l'égide de l'ONU à Mexico, le chimiste néerlandais et prix Nobel Paul Crutzen propose d'abandonner les périphrases évoquant les changements d'origine humaine au sein de l'Holocène. Il s'exclame alors : « Nous sommes dans l'Anthropocène ! ».

Cette déclaration marque symboliquement l'entrée dans une nouvelle ère, dont les signes distinctifs sont les empreintes laissées par l'humanité sur la planète : disparition de la mégafaune, augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub>, radioactivité d'origine humaine, sixième extinction des espèces, dissémination des microplastiques (De Muelenaere, 2019).

À l'origine, ces changements étaient regroupés sous l'expression « changement climatique », laissant espérer une possible réversibilité par la réduction des gaz à effet de serre. Aujourd'hui, cette perspective semble de plus en plus improbable, et le concept de « changement » cède la place à celui de « dérèglement climatique ». Bien que le dioxyde de carbone ne soit pas le seul gaz à effet de serre (les aérosols y participent également), c'est bien le CO<sub>2</sub> qui contribue le plus fortement au dérèglement actuel. Depuis la Révolution industrielle, l'Homme continue de polluer l'atmosphère, notamment par la construction d'usines, l'usage massif d'énergies fossiles et la pollution liée aux transports.

Ces émissions, attribuables à l'activité humaine, sont qualifiées d'origine anthropique. L'augmentation de la concentration de ces gaz, répartis de manière homogène dans la

troposphère, constitue la principale cause du réchauffement climatique. Leur forçage radiatif global depuis l'ère préindustrielle a été évalué à  $2,43 \text{ W/m}^2$  (Seguin, B. et al., 2008). Toutefois, le rapport de 2007 revoit cette valeur à la baisse, estimant un effet moyen d'environ  $1,6 \text{ W/m}^2$  depuis 1750. La répartition des contributions respectives en 2004 diffère légèrement de l'analyse antérieure du tableau 1 (selon le GIEC, 2001) : le dioxyde de carbone représente près de 80 % (en incluant les 19,4 % liés à la déforestation), le méthane 14,3 % (contre 20 % précédemment), et l'oxyde nitreux 7,9 % (contre 6,2 %), tandis que les autres composés ne représentent plus qu'environ 1 %, contre 10 % autrefois (Seguin, B. et al., 2008).

Dans ce contexte, une étude sur le changement climatique met en lumière l'évolution des émissions de gaz à effet de serre entre 1970 et 2019. En 2019, les émissions de  $\text{CO}_2$  hors UTCATF (Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie) atteignent 38,0 milliards de tonnes, soit une multiplication par 2,4 depuis 1970. Ces émissions proviennent à 39 % de la combustion du charbon, 30 % du pétrole, 19 % du gaz naturel, et 12 % des procédés industriels (par exemple, la transformation du calcaire en chaux pour la production de ciment) (Boudry, P. et al., 2021). La figure 1.1 illustre cette évolution des émissions de gaz à effet de serre de 1970 à 2019.

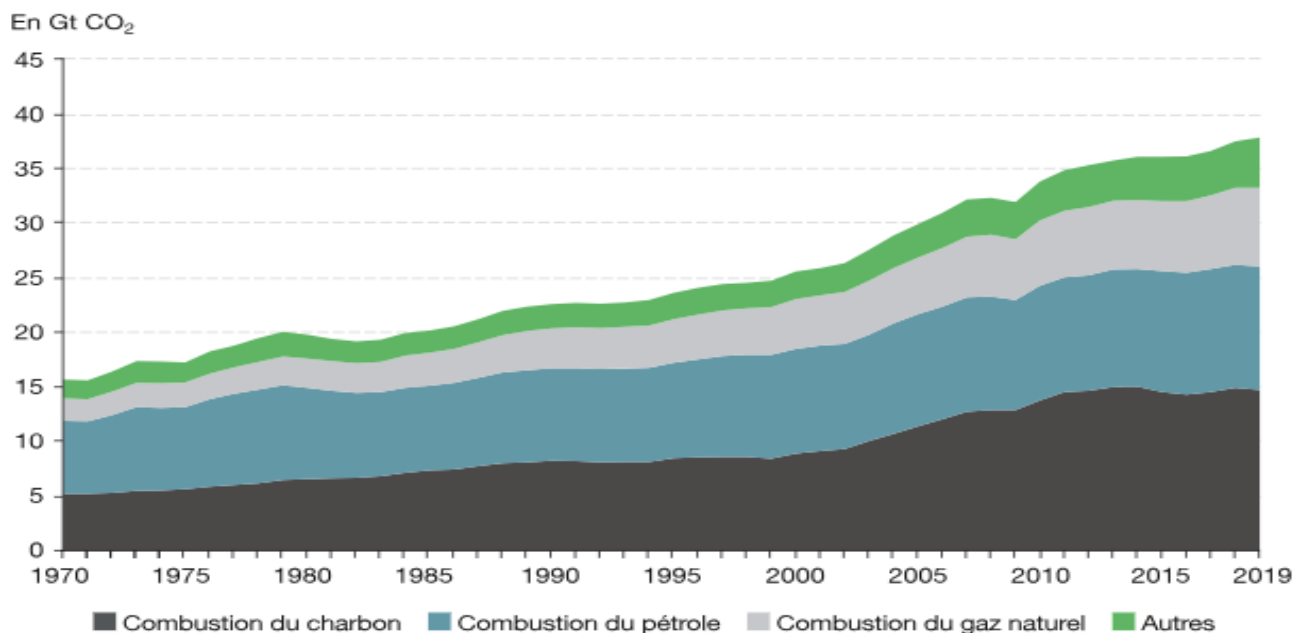


Figure 1. 1: Émissions mondiales de  $\text{CO}_2$  issues des énergies fossiles et procédés industriels (hors UTCATF) (Chiffres clés du climat : France, 2022)..

Suite à de nombreux travaux, plusieurs groupes scientifiques parmi lesquels figure le groupe GIEC (Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), se sont lancés dessus pour trouver des solutions à ce changement climatique, en l'occurrence des scénarios climatiques ont été mis en place pour parler des émissions de gaz à effet de serre. Parmi eux, le SSP1-2.6 fait partie des scénarios les plus « optimistes » avec une augmentation globale de la température atmosphérique prédite en-dessous de 2 °C d'ici la fin du siècle. C'est ce scénario qui a été adopté en 2015 par l'accord de Paris sur le climat lors de la COP21. A l'opposé, le SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathway 5) est le scénario le plus pessimiste (car c'est le scénario qui montre que les émissions augmentent fortement à 130 GtCO<sub>2</sub> jusqu'à 2090 avant de décroître légèrement) et correspond à une augmentation globale de la température atmosphérique de + 4,4 °C d'ici la fin du siècle (Grimmelpont, 2023). Sur ce, il y en a d'autres qui ont été proposés, voir figure 1.2 et détaillés sur le tableau 1.

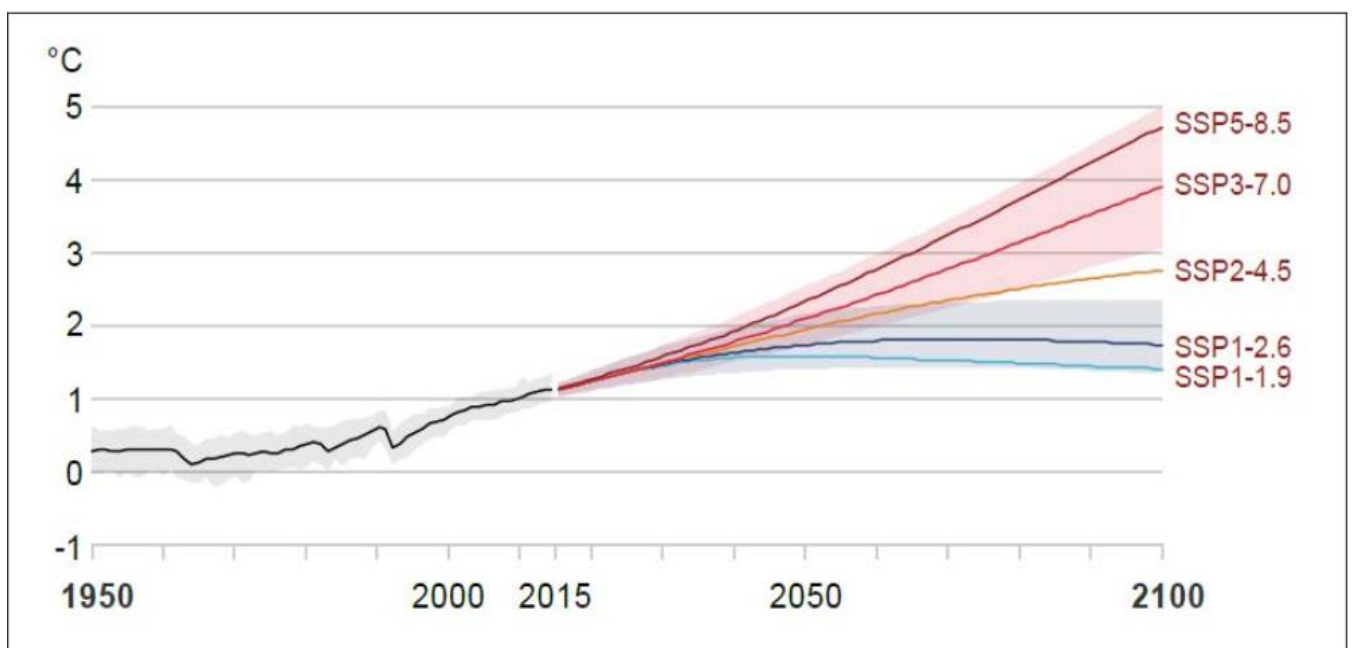


Figure 1. 2: Évolution simulée de la température mondiale (°C) par rapport à 1850-1900 selon les scénarios SSP du modèle CMIP6 (1950–2100) (Valérian, 2022).

Tableau 1: Trajectoires d'émissions nettes mondiales de CO<sub>2</sub> selon les scénarios socio-économiques (à partir de 2015) (Valérian, 2022).

Récits socio-économiques	Dénomination	Trajectoires d'émissions mondiales de CO <sub>2</sub>
« Développement durable » : forte coopération internationale	SSP1-1.9	Les émissions décroissent très fortement à partir de 2020, puis deviennent nulles peu après 2050, avant d'être négatives (- 14 Gt <sup>a</sup> CO <sub>2</sub> en 2100).
	SSP1-2.6	Les émissions décroissent très fortement à partir de 2020, puis deviennent nulles vers 2075, avant d'être négatives (- 9 GtCO <sub>2</sub> en 2100).
Poursuite des tendances actuelles	SSP2-4.5	Les émissions augmentent faiblement, avant de plafonner à 44 GtCO <sub>2</sub> vers 2040 et de diminuer jusqu'à 10 GtCO <sub>2</sub> en 2100.
Monde fragmenté, croissance économique faible et peu d'efforts en faveur de l'environnement	SSP3-7.0	Les émissions augmentent pour atteindre 82 GtCO <sub>2</sub> en 2100.
Croissance rapide, mais une forte dépendance aux énergies fossiles	SSP5-8.5	Les émissions augmentent fortement jusqu'en 2090 (130 GtCO <sub>2</sub> ), puis décroissent légèrement.

Nous venons de voir ce qui est à l'origine du dérèglement climatique observé dans notre planète, ainsi nous allons voir à quoi cela peut engendrer, autrement dit ses conséquences sur la terre de manière générale.

## 1.1 Définition et problématique du changement climatique

Le changement climatique se produit lorsque ces conditions moyennes [du climat] commencent à changer, et ses causes peuvent être naturelles ou dues à des activités humaines (United Nations Environment Programme & UNESCO, 2023). Les tendances globales observées sur la fin du XX<sup>e</sup> siècle, ou leur projection pour le XXI<sup>e</sup>, masquent une réalité bien plus complexe avec des structures régionales marquées et une intégration dans le temps de fluctuations climatiques aux échelles saisonnières à interannuelles (Cassou et al., 2007). En effet, le phénomène est un problème environnemental qui a mobilisé en amont l'attention de la science, pour ensuite, grâce au travail d'expertise, publiciser le phénomène en tant que problème socio-environnemental, sortir de la sphère purement scientifique et devenir un problème politique majeur. Nous pouvons donc dire que le changement climatique émerge sur la scène publique grâce au travail d'experts qui se sont réunis sur l'égide de l'ONU afin de constituer le Groupe d'experts sur l'évolution du climat, le GIEC (Mauger-Parat, M et al., 2013).

Le changement climatique est un bouleversement très complexe, ce bouleversement sur terre affecte en même temps tous les secteurs de la terre. Comme les secteurs sont différents, de la

même manière les définitions apportées dans chacun de ces secteurs sur ce phénomène se différencient, mais cela ne veut pas dire que les solutions ne seront pas les mêmes. Dans ce mémoire de recherche, nous allons cibler quelques secteurs avec leurs définitions du changement climatique :

- **Du point de vue scientifique** : Le changement climatique se dit d'un changement prolongé des paramètres climatiques à l'échelle locale ou globale de la terre. Dans ces paramètres, on a la température, la précipitation, le vent, les modèles météorologiques extrêmes, etc.
- **Selon le plan environnemental** : Le changement climatique est une perturbation générale de l'écosystème naturel.
- **Du point de vue politique** : Le changement climatique est un enjeu majeur qui regroupe les gouvernements de chaque pays, les organisations internationales et les sociétés civiles pour s'engager dans des actions visant à atténuer ses désastres et à s'adapter aux changements du climat inévitables.

Donc en ceci nous pouvons dire que le changement climatique, c'est lorsque la terre change complètement et de manière prolongée les phénomènes météorologiques, par exemple la température, le cycle de l'eau ou la précipitation, causant un désastre total en même temps dans divers secteurs de la planète Terre.

D'après toutes les définitions données dans les secteurs proposés ci-dessus, on peut oser confirmer que le changement climatique est problématique. Ensuite, il faut chercher à résoudre ce problème en s'intégrant dans le domaine de l'émission de gaz à effet de serre, la déforestation, la fonte des glaces et la montée du niveau des mers qui sont des raisons du pourquoi on parle du changement climatique.

D'autant plus que les diverses définitions concernant le changement climatique ont été données, ainsi nous allons parler des effets de celui-ci.

## **1.2 Effets du changement climatique sur la température de l'eau de mer**

En temps normal, l'océan joue un rôle crucial sur le maintien de l'équilibre thermique. En effet, avec la circulation thermohaline, l'océan distribue la température et la salinité des masses d'eau des régions plus chaudes, par exemple les régions équatoriales, vers les régions moins chaudes, par exemple les régions polaires, pour maintenir l'équilibre thermique afin de régulariser le climat dans les régions. Le Gulf Stream en est un exemple, car il transporte les masses d'eau

chaude surfacique vers les régions polaires mais en revanche les masses d'eau froide en profondeur sont distribuées des régions polaires vers les régions équatoriales. La circulation thermohaline est une circulation océanique à l'échelle planétaire. Encore appelée tapis roulant (conveyor belt, en anglais), elle est due aux différences de densité de l'eau de mer, qui elles-mêmes dépendent de la température (thermo) et de la salinité (haline) (Guilyardi, 2001). Avec ce même équilibre thermique l'océan fait de même pour la salinité des masses d'eau océaniques. Couvrant 71 % de la surface du globe, l'océan mondial est un écosystème complexe qui fournit des services essentiels au maintien de la vie sur la Terre. Plus de 25 % du CO<sub>2</sub> émis chaque année par l'Homme dans l'atmosphère est absorbé par l'océan et il est également le premier fournisseur net d'oxygène de la planète, jouant un rôle tout aussi important que les forêts (Fedorovsky, B., 2015). L'océan constitue donc le principal poumon de la planète et se trouve au cœur de la machine climatique planétaire (Climat P. O., 2015).

En période de dérèglement climatique, une part importante des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère est absorbée par l'océan. Celui-ci continue ainsi d'accumuler notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), principal gaz à effet de serre. Cette absorption entraîne une baisse du pH des eaux marines, les rendant progressivement plus acides. Cette acidification, combinée à une élévation de la température des masses d'eau, constitue un facteur préoccupant.

Dans ce contexte, une étude menée par Boudry et al. (2021) souligne que l'augmentation actuelle des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, et leur absorption croissante par les océans (pCO<sub>2</sub>), provoquent un réchauffement de la surface océanique, une acidification accrue (diminution du pH), ainsi qu'une réduction de la concentration en ions carbonates un phénomène connu sous le nom d'acidification des océans (AO) (Boudry, P et al., 2021).

Ce réchauffement excessif perturbe le rôle de régulateur thermique joué par l'océan dans le système climatique mondial, engendrant ainsi de nouveaux déséquilibres climatiques. Par ailleurs, l'élévation de la température à la surface de l'eau entraîne la fonte des calottes glaciaires, ajoutant de l'eau douce dans les océans. Cette dilution modifie la salinité, ce qui contribue à son tour à l'augmentation de la température des eaux océaniques.

Ce phénomène étant complexe, nous allons nous limiter là, pour nous lancer sur un point parlant des conséquences du changement climatique.

### 1.3 Conséquences du changement climatique

Le changement climatique a des conséquences très vastes et très complexes car il affecte quasiment tous les domaines (agriculture, écosystème marine etc). Ainsi les domaines dans lesquels le changement climatique peut impacter sont très nombreux, en l'occurrence nous allons en parler quelques-uns :

Dans le domaine environnemental, le changement climatique peut impacter les mers, provoquant ainsi une hausse de la température de l'eau de celles-ci, causant des événements extrêmes comme les vagues de chaleur marines et l'amplification d'autres phénomènes naturels causant de nombreux dégâts. Au plan des phénomènes naturels, nous mentionnerons ceux qui détruisent et déstabilisent les récifs : les raz de marées et cyclones, les phénomènes de blanchissement des coraux, les explosions démographiques de prédateurs et les épidémies pour ne citer que les principales. Les premiers sont généralement associés à des phénomènes El Nino (Pacifique, 2004). Ça peut également, toujours dans le même domaine, provoquer la fonte des calottes glaciaires qui en revanche va contribuer à l'augmentation des niveaux des mers donnant pour conséquence le déplacement de certaines populations.

Le changement climatique peut impacter sur l'agriculture, en donnant naissance à une grande sécheresse provoquant la mort de beaucoup de plantes, d'où la destruction des cultures par le biais d'un événement comme El niño ou les feux de forêt. À partir d'un Modèle de Circulation Générale Atmosphère-Océan (MCGAO), Lotsch (2007) trouve qu'il est susceptible que l'Afrique perde en moyenne 4,1% de ses terres cultivables en 2039, et 18,4% d'ici la fin du siècle (Tchoupé Makougoum, 2018).

Dans le domaine de la santé, le changement climatique peut favoriser la propagation de certaines maladies vectorielles comme la malaria par la variation climatique. Ça peut être l'origine des vagues de chaleur, dont celles de la marine, qui ont un impact négatif sur la santé humaine et parfois peuvent faire beaucoup de ravages.

Dans le domaine sociétal, le changement climatique peut causer la raréfaction de certaines ressources, ce qui peut par la suite provoquer des guerres entre les pays. Ça peut causer beaucoup de pertes de matériaux en cas d'inondation ou de tempêtes. Comme le montre la figure 1.3.



*Figure1. 3: Impacts des fortes pluies d'août au Sénégal : inondations et pertes associées (Sénégal, 2022, 6 septembre).*

Comme on vient de le voir, le changement climatique a des effets dévastateurs sur la planète entière. Parmi ses effets dévastateurs, nous allons parler de tout ce qui suit les vagues de chaleur marines, qui est d'ailleurs l'objectif de cette étude.

## **2. Les Vagues de chaleur marine**

L'océan couvre une vaste partie de la surface terrestre et joue un rôle essentiel dans la survie de l'humanité. Sur le plan économique et alimentaire, il constitue une ressource précieuse : la pêche contribue fortement au marché mondial et à la sécurité alimentaire des populations. Par ailleurs, il agit comme un régulateur climatique majeur. Grâce à sa capacité d'absorption du dioxyde de carbone atmosphérique, il participe à la stabilité du climat. Cependant, cette fonction a ses limites : à mesure qu'il capte davantage de CO<sub>2</sub>, l'océan devient plus acide et sa température s'élève, favorisant ainsi l'émergence de phénomènes extrêmes tels que les vagues de chaleur marines.

Le nombre de publication par an des vagues de chaleur marines de l'année 1900 – 2017 a augmenté de fréquence, de la durée, de l'intensité et de l'étendue spatiale comme le montre la figure1.4.

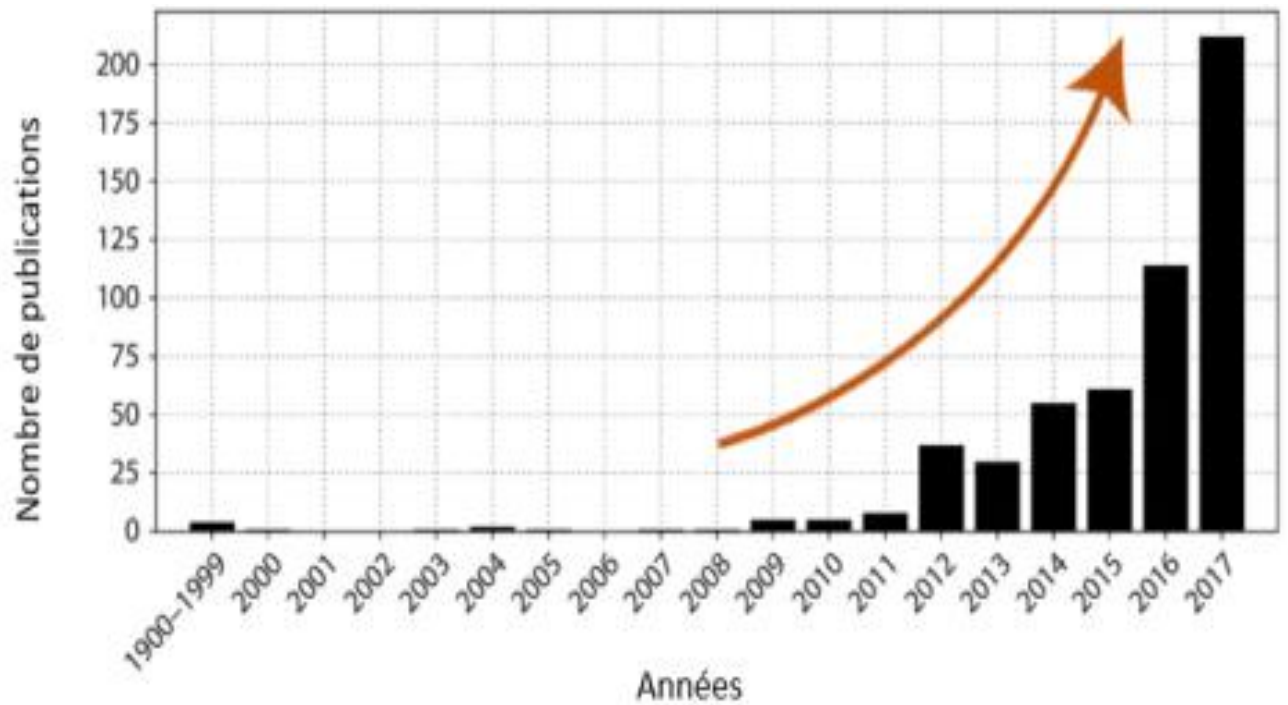
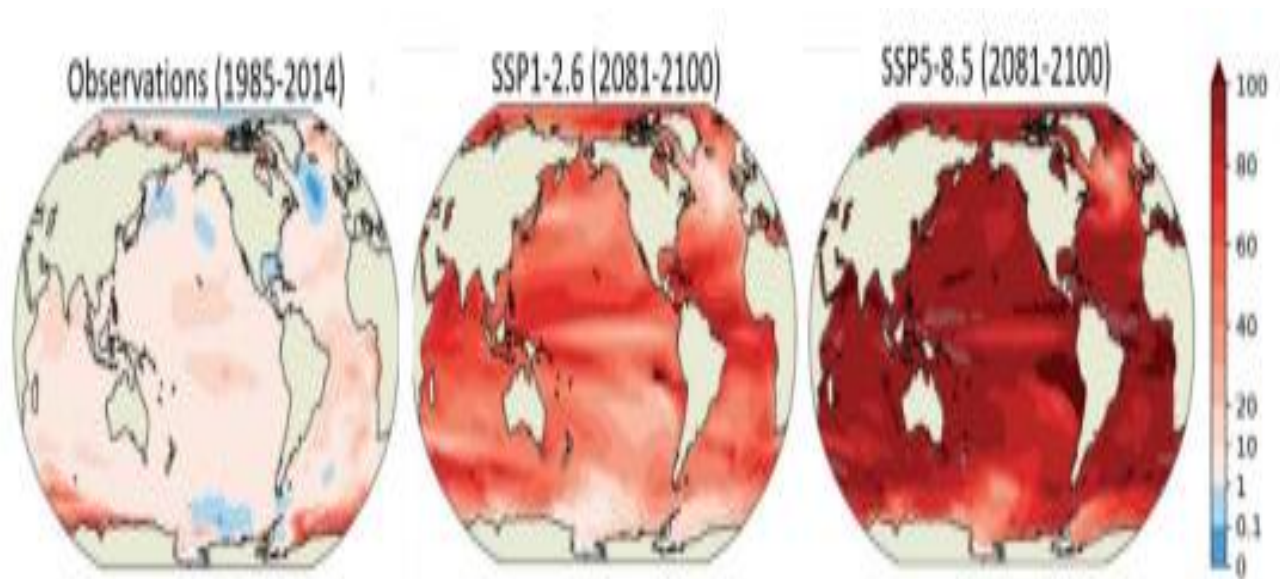


Figure 1. 4: Nombre de publications par an en lien avec les vagues de chaleur marines (Grimmelpont, 2023).

## 2.1 Définitions d'une vague de chaleur marine

Les vagues de chaleur marines sont le fruit complexe d'une combinaison de processus océaniques et atmosphériques qui peuvent prendre naissance à partir d'une modification des courants marins, par une faible apparition des vents mais aussi par une couverture nuageuse plus faible ou une augmentation de la température de l'air, de l'eau, etc.

Il existe par ailleurs une relation entre la variabilité naturelle du climat, l'apparition et l'intensité des vagues de chaleur marines. Par exemple, le phénomène "El Niño" semble accroître l'irruption des vagues de chaleur marines dans l'océan. En effet, tous les pays, régions, secteurs, la terre de manière générale est concernée comme le montre la figure 1.5.



*Figure 1. 5: Probabilité d'apparition des VCM : observée pour la période 1985-2014 et simulée pour la fin du XXIème siècle selon deux scénarios différents d'émissions de GES (SSP1-2.6 et SSP5-8.5) (Grimmelpont, 2023).*

Suite à de nombreux travaux faits sur les vagues de chaleur marine (VCM), plusieurs définitions ont été données pour mieux la connaître, la qualifier afin de pouvoir prendre des précautions sur ce phénomène. Ainsi, les vagues de chaleur marines (VCM) sont des épisodes de chaleur extrême au cours desquels la température de la surface de la mer dépasse anormalement un certain seuil (Valérian, 2022). Une vague de chaleur marine est un événement d'eau chaude discret, persistant et anormal se produisant dans une zone océanique donnée. Discret signifie qu'une VCM est un événement reconnaissable avec des dates de début et de fin claires, tandis que persistant signifie qu'il y a au moins cinq jours consécutifs de la température de la surface de la mer (SST) moyenne quotidienne au-dessus de son seuil du 90e percentile (Li, Z et al., 2023). Les vagues de chaleur marines (VCM) sont des épisodes de chaleur extrême au cours desquels la température de la surface de la mer dépasse anormalement un certain seuil. Les MHW sont des phénomènes océaniques naturels qui existent depuis longtemps. Ils peuvent persister plusieurs mois et s'étendre sur des milliers de kilomètres (Gao, Z et al., 2023). Une vague de chaleur marine est un événement d'eau chaude anormalement chaude, discret et prolongé, qui peut être décrit selon sa durée, son intensité, sa vitesse d'évolution et son étendue spatiale

Une étude montre que la définition la plus récente de ce phénomène de vague de chaleur marine est la suivante :

« *Un événement discret et prolongé d'eau anormalement chaude pour un endroit particulier* » (Grimmelpont, 2023).

Après avoir précisé les caractéristiques et les critères définissant une vague de chaleur marine, il convient désormais d'examiner les répercussions concrètes de ces phénomènes extrêmes sur différents secteurs.

## 2.2 Impacts des vagues de chaleur marine dans l'écosystème marin

Les vagues de chaleur marine ont des conséquences énormes sur l'écosystème marin.

- Dans certains secteurs européens, les vagues de chaleur marine agissent sur l'écosystème marin favorisant ainsi la dégradation de certaines algues qui ne supportent pas un certain degré de température. Comme le montre la figure 1.6, le cas d'*Alaria esculenta* qui est une algue qui aime les températures d'eau froide.



Figure 1. 6: *Alaria esculenta* est une algue brune qui apprécie les eaux froides. En raison du réchauffement climatique son aire de répartition en Europe tend à diminuer (de Bettignies, 2019).

C'est dans ce sens qu'une étude faite sur certaines espèces marines visant l'impact de celle-ci sur ces espèces montre que les VCM ont un effet néfaste chez ces dernières. Il s'avère que

l'exposition au réchauffement climatique ne permet pas aux femelles adultes de *C. glacialis* (espèce marine) de mieux tolérer une canicule marine, bien au contraire, puisque la proportion de survie la plus faible a été comptée dans le traitement de canicule dans le scénario de réchauffement (Carignan, 2020).

- Les vagues de chaleur marine peuvent impacter sur l'écosystème en agissant sur la vie de certains organismes marins, modifiant ainsi leurs modes de vie. D'après une étude faite sur des moules réparties en deux groupes, exposées à des phases de vagues de chaleur marines et des phases sans vagues de chaleur marines suivies d'une période de récupération, a montré que ces dernières étaient sensibles aux vagues de chaleur marines. En effet, parmi ses résultats obtenus, on a la figure 1.7 qui montre que les vagues de chaleur marines contribuent négativement à la survie de ces moules.

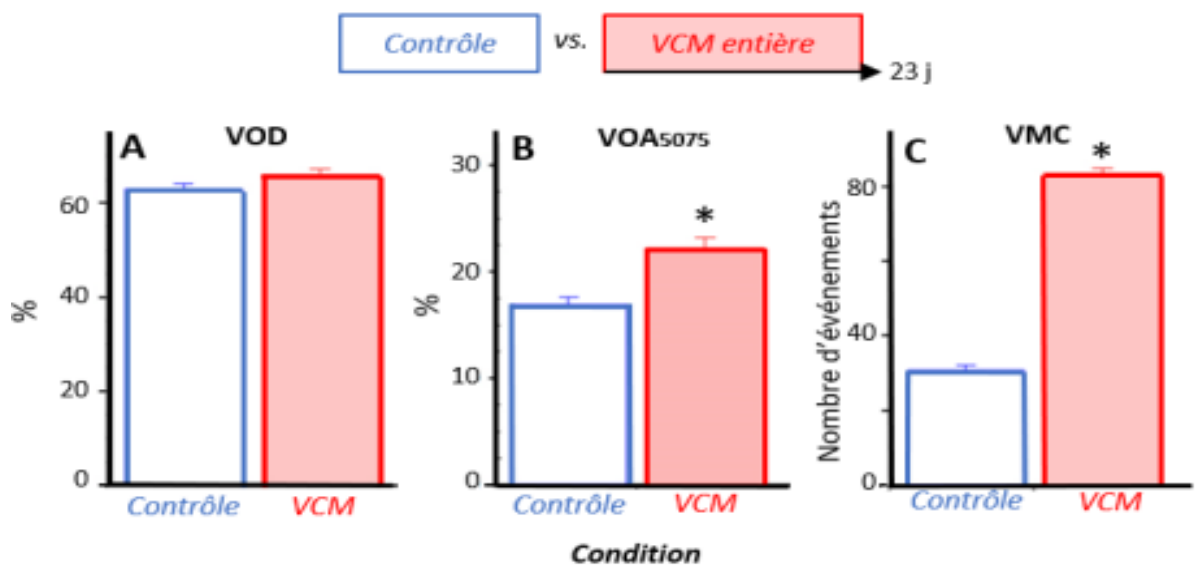


Figure 1. 7: Paramètres moyens pendant 23 jours de VCM : ouverture stomatique et micro-fermetures horaires (Grimmelpont, 2023).

### 2.3 Impacts des vagues de chaleur marine dans l'environnement humain

Lors des conséquences des vagues de chaleur marines, tous les habitants terrestres sont concernés. Nos modes de vie, nos sources de revenus et nos alimentations, ainsi que nos cultures côtières sont directement menacées.

En 2018, la canicule marine a provoqué la mort d'un grand nombre d'holothuries d'élevage dans la mer de Bohai, entraînant une perte de 68 000 tonnes de production, avec une perte économique directe de 6,87 milliards CNY. La mortalité massive des pétoncles de l'île Zhuangzi dans la mer de Bohai en 2017 a également été principalement causée par une vague de chaleur marine (Gao, Z et al., 2023).

Un événement de VCM sans précédent, avec une intensité maximale d'environ 20 °C, a été l'une des principales causes du blanchissement record des récifs au large du nord de la mer de Chine méridionale au cours de l'été 2020 (Gao, Z et al., 2023).

Une augmentation continue de la température de la mer dans l'océan Pacifique Nord entre 2013 et 2015 (connue sous le nom de « Blob ») a gravement affecté l'écosystème marin local et les ressources halieutiques (Carignan, 2020). En 2016, l'Australie La Grande Barrière de Corail a subi un grave blanchissement des coraux en raison du VCM qui a été entraîné par un fort événement El Nino (Platform, 2024).

Les vagues de chaleur marines peuvent causer la migration et parfois la disparition de certains organismes marins, et en revanche créer une pénurie de ces organismes dans certains secteurs comme le montre la figure 1.8.

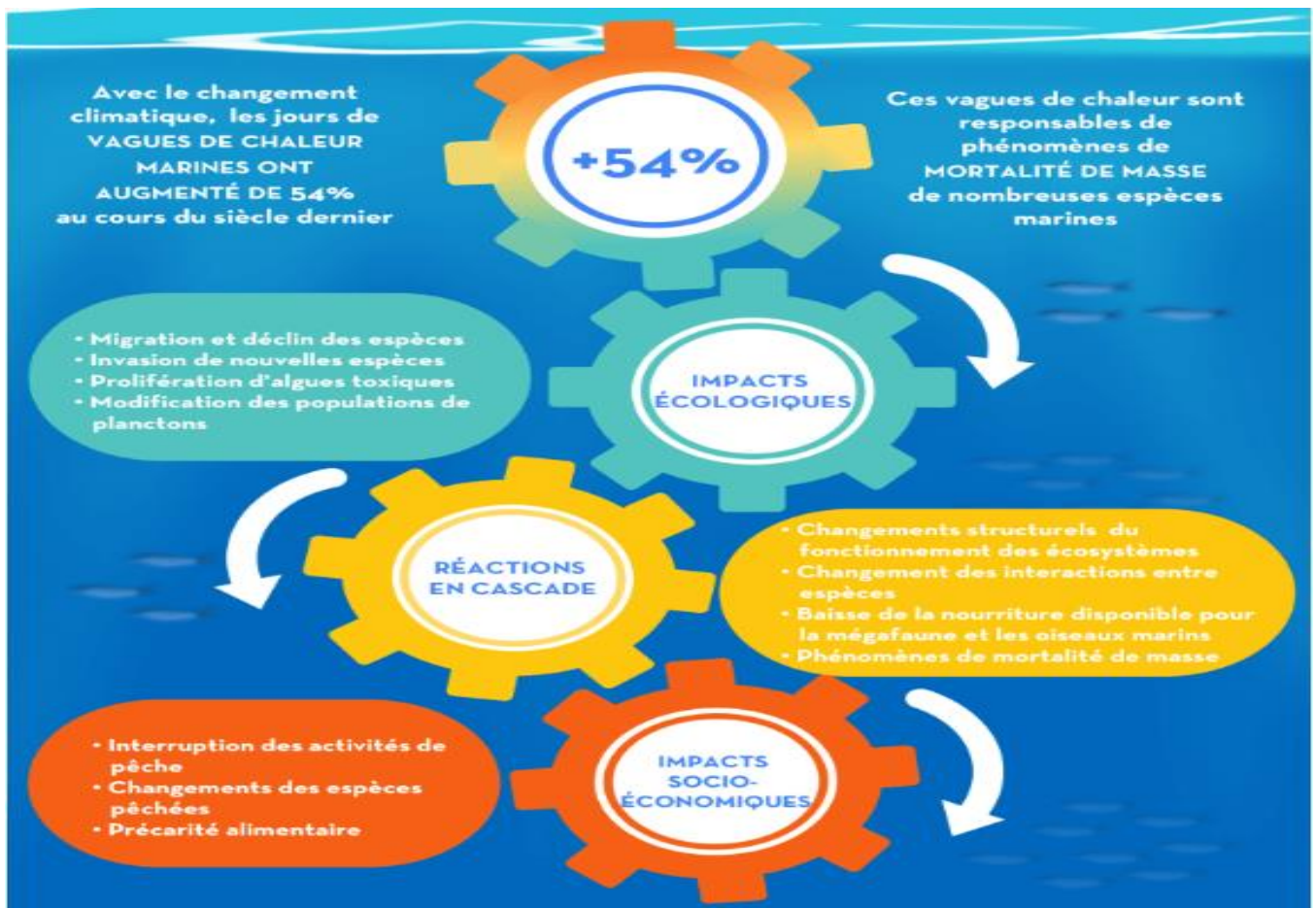


Figure 1. 8: les vagues de chaleur marines affectent la vie marine et les communautés humaines (Platform, 2024).

## 2.4 Impacts des vagues de chaleur marine sur le climat

Les vagues de chaleur marines ont des effets néfastes aussi bien dans l’océan que dans l’atmosphère. Sur ce, nous allons en parler un peu :

- Impacts des vagues de chaleur marines dans l’océan

Étant donné qu’elles découlent des températures plus élevées que la normale dans l’océan, les vagues de chaleur marines peuvent perturber les courants marins et par la suite une perturbation de la circulation thermohaline et peut même aller au-delà car ça peut amplifier les ouragans et les tempêtes.

Elles peuvent, avec une augmentation forte de la température de l’océan, acidifier celui-ci. Par conséquence, l’océan se transforme en un faible puit de carbone, car étant acidifié sa capacité à absorber du carbone diminue.

Elles peuvent également favoriser une forte évaporation des eaux océaniques, donc une perturbation du cycle de l'eau. En l'occurrence, ceci a pour conséquence une modification des précipitations.

- Impacts des vagues de chaleur marines sur l'atmosphère

L'impact des vagues de chaleur marines dans l'océan, transformant celui-ci en un faible puits de carbone, a pour conséquence une accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, alors qu'il est reconnu comme étant un gaz à effet de serre causant aujourd'hui le dérèglement climatique.

Les vagues de chaleur marines tuent également beaucoup d'algues toxiques qui, en revanche, vont rejeter leurs quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère d'une part. D'autre part, elles peuvent causer la libération de la quantité du gaz méthane piégé dans les hydrates de méthane sous-marins.

Après avoir fini sur les impacts qu'à la vague de chaleur marine sur le climat, nous allons terminer ce chapitre sur des méthodes prises pour minimiser celles-ci.

### **3. Méthodes prises pour minimiser les vagues de chaleur marine.**

En ce point-ci, minimiser les vagues de chaleur marines, c'est de rebondir sur la réduction des émissions des gaz à effet de serre. C'est la raison pour laquelle des COP (Conférences de Partie) ont été organisées, ainsi des politiques de tarification du carbone sont mises en œuvre en Europe et dans le monde, notamment pour réorienter les flux d'investissement. Face à ce défi, les gouvernements ont signé en 1992, lors du sommet de Rio de Janeiro, la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. Plusieurs rencontres internationales ont eu lieu depuis (notamment Kyoto en 1997, Bali en 2007, Copenhague en 2009, Cancun en 2010, Durban en 2011). Le protocole de Kyoto prévoyait pour 38 pays industrialisés une réduction des émissions de GES de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, avec des objectifs variables selon les régions du monde (-8% pour l'Union européenne, stabilisation pour la France) (Pellerin, S et al., 2013). Cet objectif ne peut être atteint que si les pays développés, principaux responsables actuels des rejets, font un effort spécifique et visent une réduction d'un facteur 4, laissant aux pays en développement une marge de manœuvre pour leur permettre d'assurer un minimum de croissance indispensable (Climat, 2008). La France s'est dotée d'une stratégie nationale bas-carbone et de budgets carbone afin de mettre en œuvre la transition vers une économie sobre en GES (Boudry, P et al., 2021). Dans le même contexte d'atténuation, David Keith, professeur à Harvard, a une théorie intéressante sur la façon de ralentir le

réchauffement climatique. Il souhaite pulvériser des particules de dioxyde de soufre dans la stratosphère pour créer une barrière réfléchissante qui détournerait les radiations et abaisserait la température mondiale (Boulet-Gercourt, 8 août 2021).

D'autres proposent de limiter l'artificialisation des sols et d'utiliser des énergies renouvelables plutôt que les énergies fossiles. IL y en a même certains qui proposent des solutions accentuées sur le concept d'adaptation et font référence à l'îlot de fraîcheur. Le recours aux îlots de fraîcheur comme le Cotentin semble d'ores et déjà être une réalité et pose ainsi les premiers jalons de l'émergence d'un refuge climatique (David, M et al., 2022).

Après avoir clarifié divers points nous permettant de mieux appréhender les vagues de chaleur marine, nous trouvons essentiel de passer à la méthodologie utilisée dans cette étude pour décrire de façon précise et systématique l'analyse de ce phénomène de vague de chaleur marine.

## Chapitre2 : Méthodologie

### 1. Présentation de la zone d'étude

La figure2.1 montre notre zone d'étude, elle se situe dans l'océan Atlantique tropical oriental entre les latitudes allant de 5°N à 25°N et les longitudes allant de 40°W à 14°W. Cette zone est caractérisée par un climat tropical marqué par des températures chaudes avec une variation modérée. D'ailleurs une partie de cette zone est influencée par la circulation du gyre anticyclonique permettant une distribution de la chaleur dans cette zone (Beucher, 2010). Cette chaleur et les courants océaniques dans cette zone favorisent une biodiversité riche, incluant des zones de pêches favorables.

Elle est aussi caractérisée par des saisons de pluies et sèches distinctes qui peuvent durer jusqu'à cinq mois, une humidité élevée et des cyclones fréquents qui peuvent provoquer des vents violents et parfois de fortes précipitations et des vagues destructrices.

L'Atlantique, en incluant ses mers adjacentes, a une profondeur moyenne d'environ 3 646 m (11 962 ft) et une profondeur maximale de 8 380 m (fosse de Porto Rico) (Encyclopaedia Britannica, 2025).

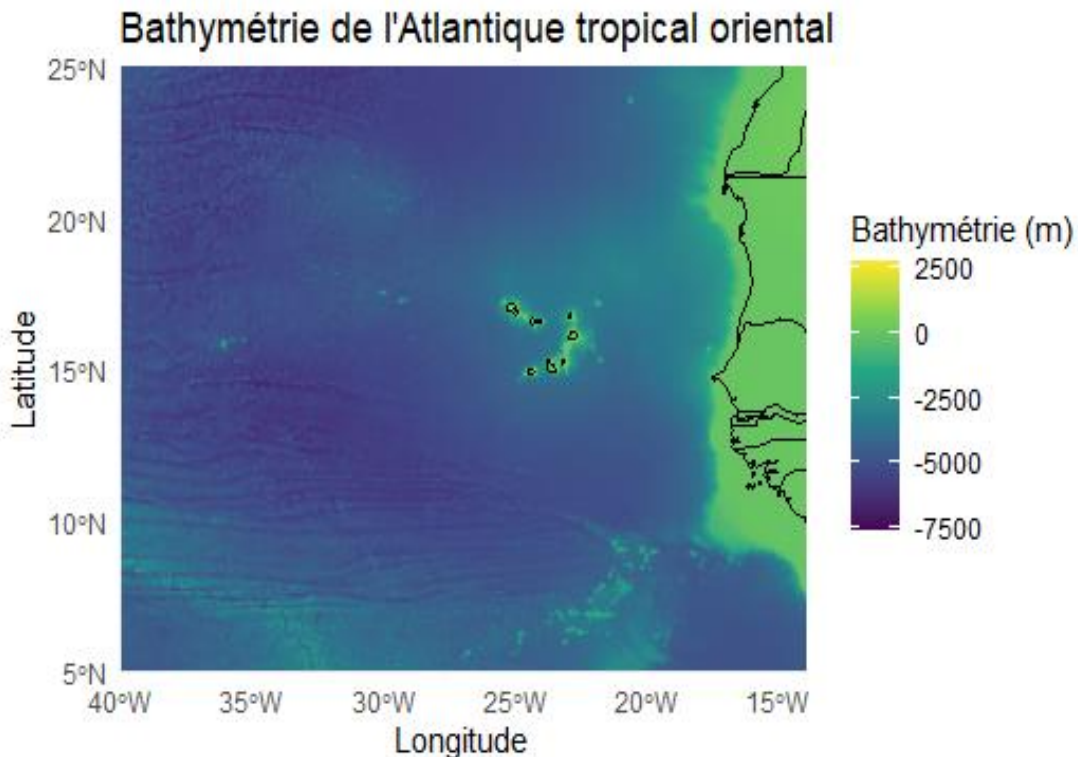


Figure2.1 : Atlantique tropical Oriental

## 2. Données utilisées

Dans cette étude, trois types de données ont été utilisées : des données « optimum interpolation sea surface temperature » (OISST) de NOAA, celles de la chaleur latente et sensible de ERA5 et celle de la profondeur de notre zone d'étude de GEBCO-2024 que nous allons détailler dans les lignes qui suivent.

- ✓ Les données OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) sont des mesures quotidiennes interpolées de la température de surface de la mer (SST), disponibles à une résolution de 1/4 de degré à l'échelle mondiale depuis le 1er septembre 1981. Issues principalement du radiomètre AVHRR, elles sont corrigées à l'aide de données provenant de satellites, navires, bouées et flotteurs Argo, en se référant aux bouées pour réduire les biais. Ces données ont été utilisées pour analyser les vagues de chaleur marines (VCM) sur la période du 1er janvier 1982 au 31 décembre 2019, à partir de fichiers au format .RDS fournis par le NCDC de la NOAA.
- ✓ Les données ERA5 sont la nouvelle génération de réanalyses produites par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). Elles sont disponibles en ligne et regrillées sur une grille régulière latitude-longitude de 0,25° pour l'atmosphère et de 0,5° pour les vagues océaniques et l'incertitude. Ces données, mises à jour quotidiennement avec environ 5 jours de latence, offrent une résolution horizontale fine pour une analyse précise du climat et des phénomènes atmosphériques.
- ✓ Les données GEBCO-2024, utilisées dans cette étude, fournissent des informations bathymétriques et topographiques détaillées de la zone d'étude, notamment sur la profondeur marine. Ce modèle global représente les élévations terrestres et sous-marines à une résolution de 15 secondes d'arc (soit 1/240e de degré). Il est accompagné d'une grille TID (Type Identifier) précisant les sources de données utilisées pour générer la grille GEBCO\_2024.

## 3. Méthodes

Dans cette partie, nous allons décrire les méthodes utilisées pour mieux caractériser les vagues de chaleur marines dans l'océan Atlantique tropical Oriental (notre zone d'étude). Sur ce une étude thermodynamique des chaleurs latente et sensible est faite pour appuyer nos résultats.

Une vague de chaleur marine est un événement d'eau chaude discret, persistant et anormal se produisant dans une zone océanique donnée. Il est discret car c'est un événement reconnaissable avec des dates de début et de fin claires tandis que persistant signifie qu'il y a au moins cinq

jours consécutifs de la température de la surface de la mer (SST) moyenne quotidienne au-dessus de son seuil du 90<sup>ème</sup> percentile. Ce phénomène est défini comme tel (Une vague de chaleur) lorsque la température de surface de la mer dépasse un certain seuil défini pendant au moins cinq (5) jours consécutifs (Li, Z et al., 2023).

### 3.1. Caractéristiques des vagues de chaleur marines :

Dans cette partie, la définition et la formule de chaque caractéristique des vagues de chaleur marine est données. Les vagues de chaleur marines sont caractérisées par leur durée, leur fréquence, leur intensité.

- Durées des VCM : c'est le nombre de jours de la date de début jusqu'à celle de la fin pendant lequel la température de surface de la mer dépasse le seuil de la température de surface de la mer. De manière générale la durée d'un événement de vague de chaleur marine est calculée par la formule suivante :

$$D_{urée} = t_f - t_d + 1$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} t_f \text{ est la date finale d'un événement de vague de chaleur marine} \\ t_d \text{ est la date de début de ce même événement de vague de chaleur marine} \end{array} \right.$$

- Fréquences des VCM : C'est le nombre de fois par an que les vagues de chaleur marines reviennent dans cette zone d'étude sur toute la période. Après les avoir détectées, on compte le nombre de vagues de chaleur marines par an. La formule générale pour le calcul des fréquences des vagues de chaleur marines est donnée comme suite :

$$F_{réquence} = \frac{N}{T}$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} N \text{ est le nombre total des vagues de chaleur marines détectées} \\ T \text{ est la durée de la période d'observation des VCM ici du } 1982 - 01 - 01 \text{ au } 2019 - 12 - 31 \end{array} \right.$$

- Intensités moyennes : c'est l'anomalie de la température moyenne de surface de la mer durant cette période de vague de chaleur marine.

Le calcul de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marines d'après (Gao, Z et al., 2023) se fait comme suite :

$$I = SST_{observée} - T_m \text{ ssi } SST_{observée} > T_m \text{ (pour l'intensité des vagues de chaleur marine)}$$

$$I_{moy} = \sum (SST_{observée} - T_m) / N$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_m \text{ est la moyenne climatologique prise sur la période 1982 à 2019} \\ SST_{observée} \text{ la température de la surface de la mer observée sur une période 1982 à 2019} \\ I \text{ est l'intensité des vagues de chaleur marines} \\ I_{moy} \text{ est l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine} \end{array} \right.$$

La somme des intensités des vagues de chaleur marine sur le nombre d'observation, donne l'intensité moyenne des vagues de chaleur marines.

- Leurs intensités cumulées : c'est la somme des anomalies de température quotidiennes dépassant l'intensité moyenne climatologique.
- Leurs intensités maximales : c'est l'anomalie de SST maximale pendant une période de vague de chaleur marine.

### 3.2. Catégories des vagues de chaleur marine

Dans cette partie nous allons parler des types de VCM et comment on a procédé pour les identifier. En fonction de l'anomalie de la température de surface de la mer (SST) et de sa durée, nous distinguons différentes catégories de vagues de chaleur marine.

Dans une région frappée par des événements de VCM, on peut assister à :

- **Des VCM faibles**

Ce sont des VCM dont l'anomalie de la SST est généralement inférieure à 1 degrés Celsius, avec une durée allant des jours jusqu'à parfois des semaines.

- **Des VCM modérées (catégorie I)**

Ce sont des VCM dont l'anomalie de la SST est généralement comprise entre 1 à 2 degrés Celsius, avec une durée allant des jours jusqu'à parfois des semaines.

- **Des VCM fortes (catégorie II)**

Ce sont des VCM dont la SST est généralement comprise entre 2 à 3 degrés Celsius, avec une durée allant des semaines jusqu'à parfois des mois.

- **Des VCM extrêmes (catégorie III)**

Ce sont des VCM dont la SST est généralement supérieure à 3 degrés Celsius, avec une durée allant des mois jusqu'à parfois une année.

### 3.2.1 Méthode de calcul des catégories de vagues de chaleur marine

Pour décrire la gravité des vagues de chaleur marines, les catégories de vagues de chaleur marine sont divisées en quatre niveaux selon la définition de Hobday (Li, Z et al., 2023) Cette formule ci-dessous permet de bien identifier et catégoriser les vagues de chaleur marines :

$$N = \frac{sst - T_m}{T_{90} - T_m}$$

N indique le type ou la catégorie de vague de chaleur marine, elle peut varier d'une zone à une autre, c'est une variable par rapport à constante ( $T_{90} - T_m$ ).

Avec  $\left\{ \begin{array}{l} sst \text{ est la température de surface de la mer} \\ T_m \text{ est la moyenne climatologique} \\ T_{90} \text{ est le } 90^e \text{ percentile des données de la sst depuis 1982 à 2019} \end{array} \right.$

Suivant les valeurs de N, nous identifions les types de VCM comme suit :

Lorsque  $N \leq 1$ , il est défini comme une VCM faible ;

Lorsque  $1 < N \leq 2$ , il est défini comme une VCM modérée (catégorie I) ;

Lorsque  $2 < N \leq 3$ , il est défini comme une VCM forte (catégorie II) ;

Lorsque  $N > 3$ , il est défini comme une VCM extrême (Catégorie III).

### 3.2.2 Probabilité d'apparition des catégories de VCM

Cette partie met l'accent sur combien de fois chaque catégorie de VCM a la chance de revenir mais nous avons besoin d'abord de connaître leurs fréquences. Connaissant la fréquence de la catégorie X de VCM et la fréquence totale des VCM, il est possible de calculer la probabilité d'apparition de la catégorie X de VCM par la formule :

$$P(X) = \frac{\text{Fréquence de la catégorie } X}{\text{Fréquence totale de VCM}}$$

Avec X une VCM de catégorie faible, modérée, forte ou extrême.

Fréquence totale de VCM =  $\sum$  Fréquences des catégories de VCM

## **Chapitre3 : Résultats et discussions**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre étude. Les caractéristiques des vagues de chaleur marine dans notre zone d'étude, telles que la durée, l'intensité cumulée, l'intensité moyenne et l'intensité maximale sont analysées en fonction de l'échelle interannuelle et saisonnière. Il en est de même de la répartition spatiale et de la tendance temporelle sur une période de 38 ans, allant de 1982 à 2019. Nous y avons également abordé l'étude thermodynamique entre l'océan et l'atmosphère, en particulier la chaleur latente et sensible dans cette zone d'étude, mais aussi à une analyse de la bathymétrie de la mer afin de mettre en cohérence nos résultats avec les phénomènes qui les influencent avant tout.

### **3.1 Variations interannuelles des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur la période 1982- 2019.**

Pour mieux comprendre comment les vagues de chaleur marine varient d'une année à une autre, nous avons analysé leurs caractéristiques à l'échelle interannuelle.

#### **3.1.1 Variation interannuelle de la durée moyenne des vagues de chaleur marine.**

La figure 3.1 illustre la variation de la durée moyenne des VCM à l'échelle interannuelle de 1982 à 2019. Nous observons que la plage de la durée moyenne varie entre 10 et 15 jours. La courbe représentative de celle-ci montre une hausse avec un maximum de durée quasiment égal à 15 jours atteint en 2019, alors que la durée minimale est de presque 11 jours et est observée en 1997. Une analyse plus poussée de cette courbe montre des phases de variations interannuelles pouvant être réparties comme suit :

- Une légère phase de croissance allant de l'année 1982 jusqu'à vers le début des années 1990 avec un pic de presque 13 jours.
- Une phase de baisse progressive depuis le début des années 1990 jusqu'en 1997 , avec une durée minimum de presque 11 jours
- Une phase relativement stable de presque 11 jours allant de 1997 à 2013.
- Une phase de croissance remarquable notée depuis 2013 jusqu'à 2019, avec le plus grand pic de presque 15 jours.

La dernière décade de notre période d'étude présente donc des durées plus grandes que les années précédentes, suggérant ainsi une augmentation récente marquée de la durée des VCM et donc une augmentation des impacts sur l'écosystème marin.

La variation interannuelle de la durée moyenne des vagues de chaleur marine indique une baisse après une légère augmentation entre 1982 et 1997. Ceci pourrait être dû à la variation naturelle de la température de l'océan telle que l'oscillation de l'Atlantique du Nord, par exemple en ces périodes des phases de refroidissement liées à l'oscillation de l'Atlantique du Nord ou des régions beaucoup plus fraîches pourraient avoir réduit la durée moyenne des VCM. Ensuite, de 1997 à 2013, la durée moyenne reste relativement constante. Cela pourrait être causé par l'équilibre temporel des phénomènes climatiques naturels. Enfin, de 2013 à 2019, on observe une phase d'augmentation significative de la durée moyenne. Ceci pourrait être dû à l'influence du changement climatique qui a un impact dans certains événements tels que EL niño qui avait eu lieu de l'année 2015 à 2016 et qui a un impact fort sur la durée moyenne. Ceci pourrait être dû aussi à l'anomalie de la température des océans.

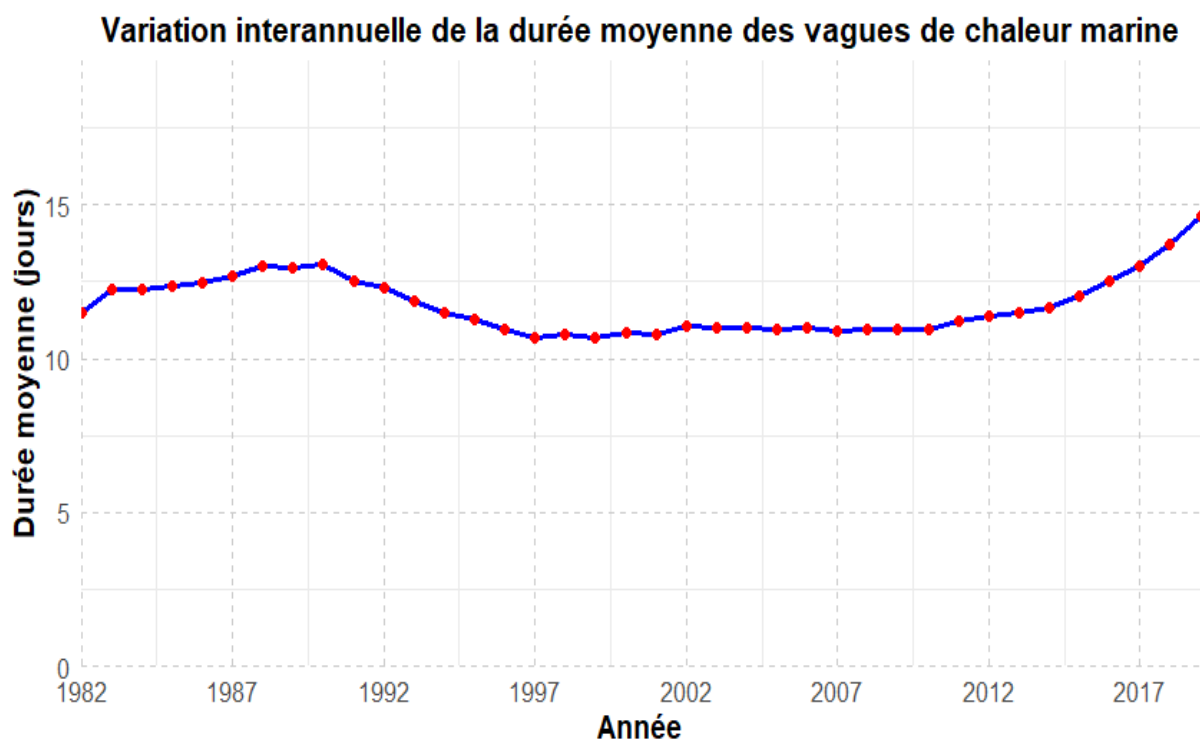


Figure 3.1 : Variation interannuelle de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

### **3.1.2 Variation interannuelle de l'intensité cumulée moyenne, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine.**

La même analyse est faite avec l'intensité cumulée moyenne, l'intensité moyenne et l'intensité maximale moyenne. La figure 3.2 montre la variation interannuelle de l'intensité cumulée moyenne des VCM. Nous constatons que l'intensité cumulée moyenne varie entre 12° et 21 °C par jour. Sa courbe représentative montre une variation similaire à celle de la durée moyenne, avec un maximum quasiment égal à 20°C par jour atteint en 2019 et un minimum de presque 14°C en 1997.

Les phases de variation interannuelle de cette courbe peuvent être caractérisées de la manière suivante :

- Une période de croissance modérée débute en 1982 et se prolonge jusqu'au début des années 1990, avec un maximum d'intensité cumulée d'environ 18 °C par jour.
- Une diminution progressive s'est produite depuis le début des années 1990 jusqu'en 1997, avec une intensité cumulée moyenne la plus basse d'environ 14 °C par jour.
- Une phase relativement stable notée de 1997 jusqu'à 2013 de valeur d'environ 14 °C/j
- Une phase de croissance prononcée allant jusqu'à 2019, avec une intensité cumulée la plus grande, de valeur d'environ 20 °C.

L'intensité cumulée des VCM varie de la même manière que la durée pendant toute la période d'étude. Cela pourrait être attribué au même facteur que celui de la durée moyenne.

La variation de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine est également analysée dans cette partie. La figure 3.3 illustre la variation de l'intensité moyenne des VCM à l'échelle interannuelle, et montre qu'elle varie entre 0,75 et 1,5°C sur toute la période d'étude. La courbe présente une forte variabilité interannuelle et montre une faible augmentation de la valeur de l'intensité moyenne durant toute cette période. En effet, sa variation est relativement constante avec beaucoup de fluctuations dont le maximum est enregistré avec une valeur d'environ 1,25°C en 2007 et le minimum d'environ 0,9°C vers le début des années 2000. En effet, les fluctuations parmi lesquelles les plus remarquées sont les pics de l'année 1987 qui pourraient être dus à la venue de l'événement El Nino qui avait eu lieu de 1986 à 1987 et qui a réchauffé les masses d'eau dans les régions tropicales et subtropicales.

Ceci est en conformité avec les résultats de (Hobday, A. J et al., 2018) qui atteste que dans ses résultats la zone de l'océan présentant des VCM forts, sévères ou extrêmes augmente clairement pendant les périodes d'El Niño extrêmes (1982/83, 1997/98 et 2015/16). Il y a également les pics de l'année 2007 et 2014 qui pourraient être dus aux phénomènes régionaux, aux flux d'échange de chaleur entre l'océan et l'atmosphère, ou bien même à la stratification thermique de l'océan.

La variation interannuelle de l'intensité maximale moyenne est présentée sur la figure 3.4. Nous avons remarqué que l'intensité maximale moyenne varie très peu entre 1,5°C et 1,75°C, son illustration globale est quasi constante avec très peu de fluctuations. Le maximum est enregistré avec une valeur d'environ 1,7°C vers les années 1980 et le minimum d'environ 1,6°C vers le début des années 1990. Cela traduit que les VCM gardent quasiment les mêmes intensités maximales en moyenne sur toute la période. En effet, de l'année 1982 à 1997 on observe une phase de baisse progressive. Celle-ci pourrait être due à l'influence transitoire de La Nina ou bien des phénomènes climatiques naturels exemple le phénomène d'upwelling. De l'année 1997 à 2013, on observe une phase relativement constante. Elle pourrait être due à un équilibre temporel des phénomènes climatiques. Enfin, de 2013 à 2019, on observe une phase de légère augmentation. Cela pourrait être due à l'influence du changement climatique qui a peu d'impact sur les événements tels que El niño et qui, à leur tour, ont peu d'impact sur l'intensité maximale moyenne.

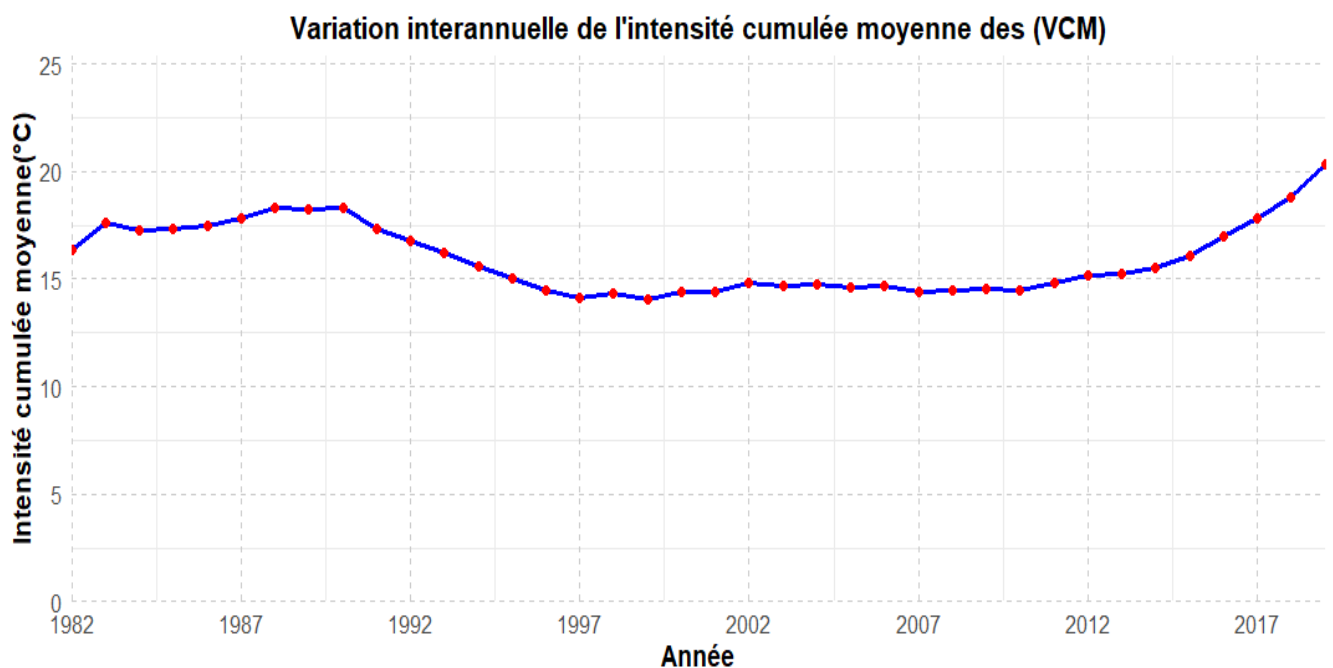


Figure 3.2 : Variation interannuelle de l'intensité cumulée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

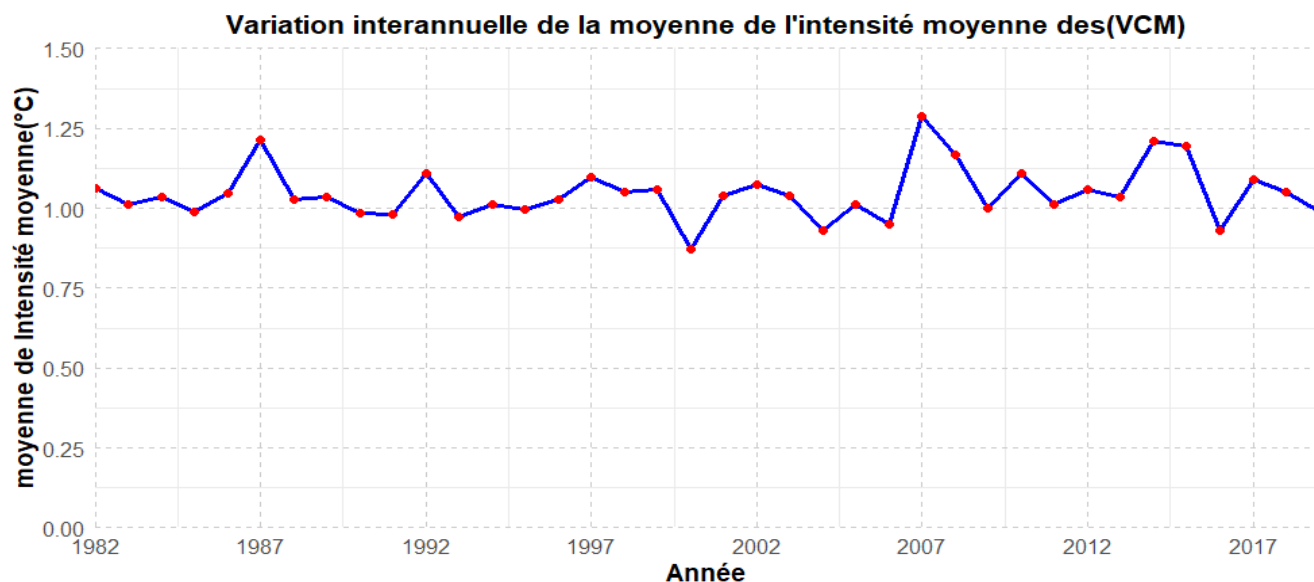


Figure 3.3 : Variation interannuelle de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

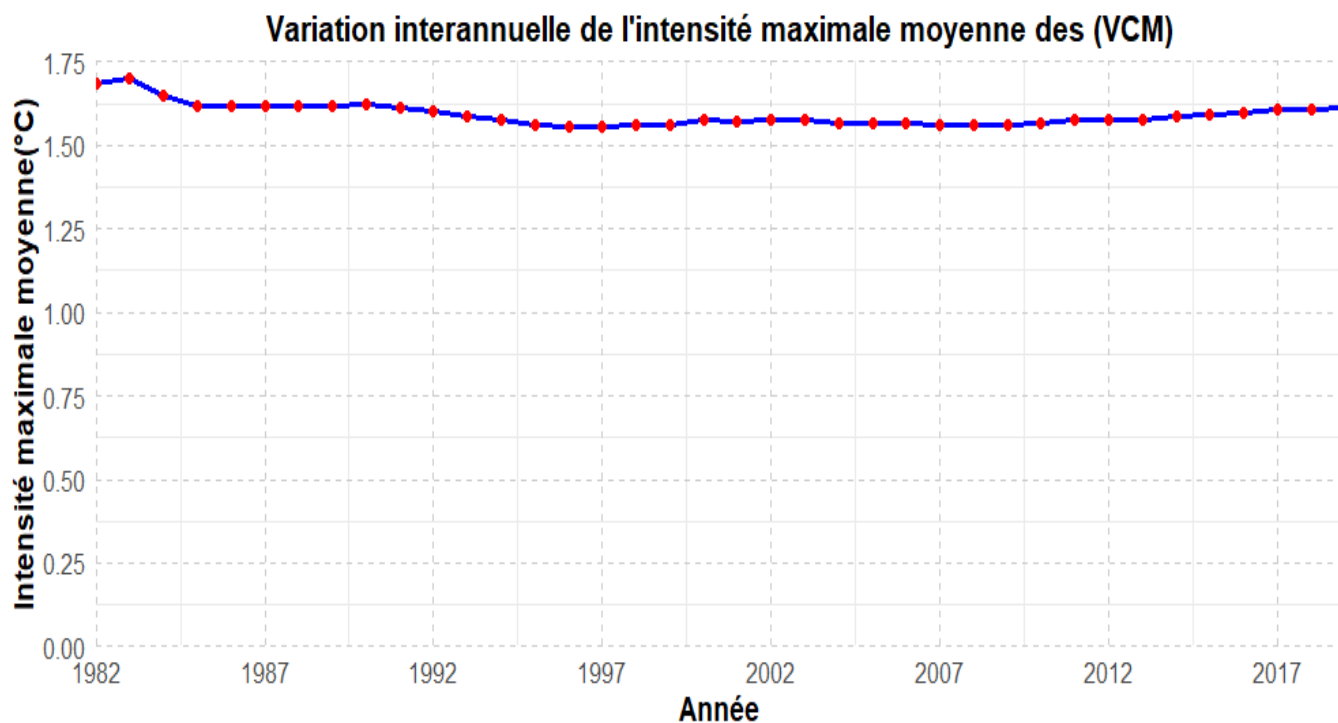


Figure 3.4 : Variation interannuelle de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

### **3.1.3 Variation interannuelle de la moyenne du taux d'apparition et déclin des vagues de chaleur marine**

La variation du taux moyen d'apparition et de déclin des VCM est mise en évidence dans ce paragraphe. La figure 3.5 illustre la variation interannuelle de la moyenne du taux d'apparition des VCM, et montre qu'il varie entre 5% et 45%. La variation du taux d'apparition des VCM est relativement constante et varie autour de 20%, avec une forte fluctuation dont les maxima sont enregistrés dans les années 1998, 2003 et 2018 avec des valeurs respectivement égales à 35% et presque 40% pour les autres. Quant au minimum, sa valeur est de 7,5 % vers l'année 2014, accompagnée d'une remontée rapide.

En observant la courbe ci-dessous, on peut constater que ces événements de vagues de chaleur marine commencent à prendre ampleur vers 1996 avec une variation significative du taux d'apparition.

De la même manière, la figure 3.6 illustre la variation interannuelle de la moyenne du taux de déclin des VCM, et montre qu'elle est à peu près similaire à celle de la moyenne du taux d'apparition. Cependant, la variation du taux de déclin des vagues de chaleur marine est plus importante en 1993 et en 2013, accompagnée par des décroissances rapides. Son maximum a atteint une valeur d'environ 45% en 2013 et son minimum la valeur de 7,5% en 2017. Nous constatons également que ces événements de vagues de chaleur marine ont une diminution rapide entre 1992 et 1994 et entre 2012 et 2013 avec une variation significative du taux de déclinaison.

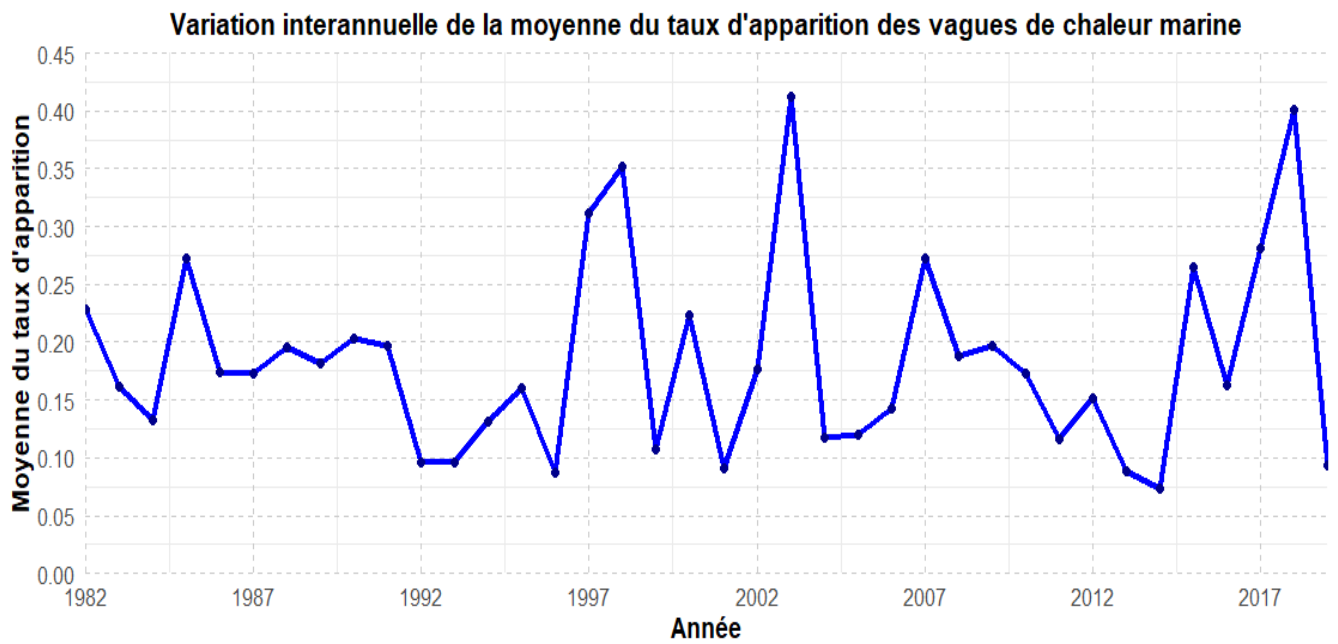


Figure 3.5 : Variation interannuelle de la moyenne du taux d'apparition des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

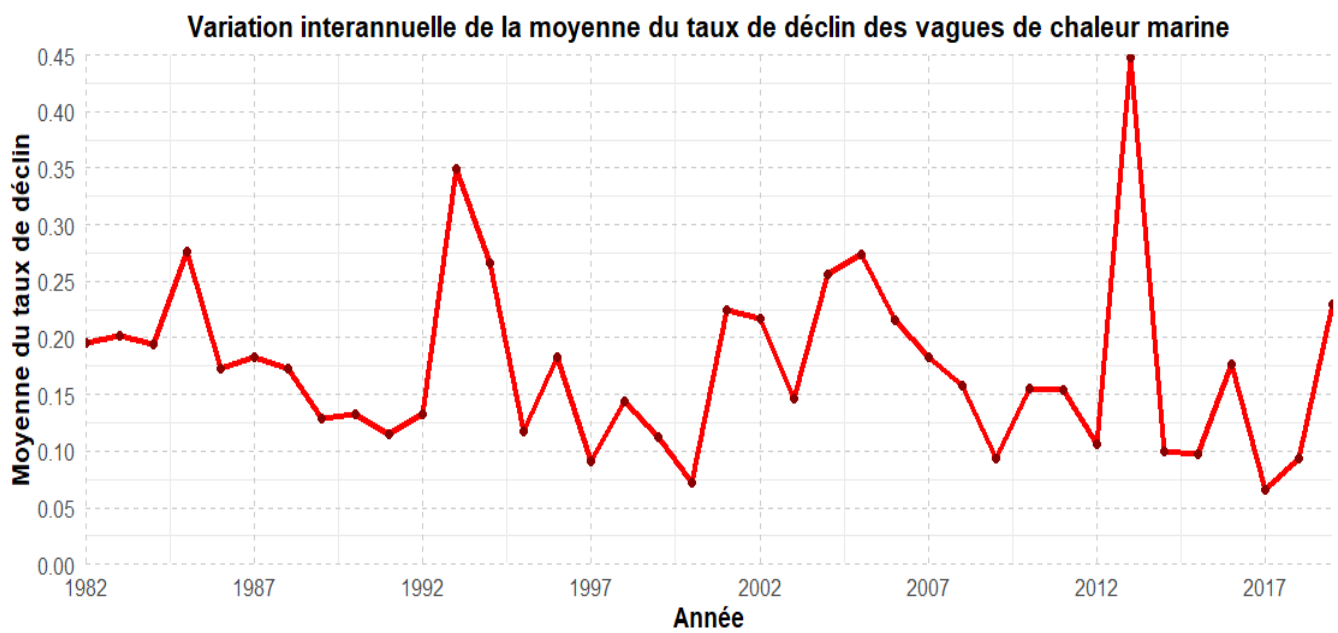


Figure 3.6 : Variation interannuelle de la moyenne du taux de déclin des vagues de chaleur marine sur une période de 1982 – 2019.

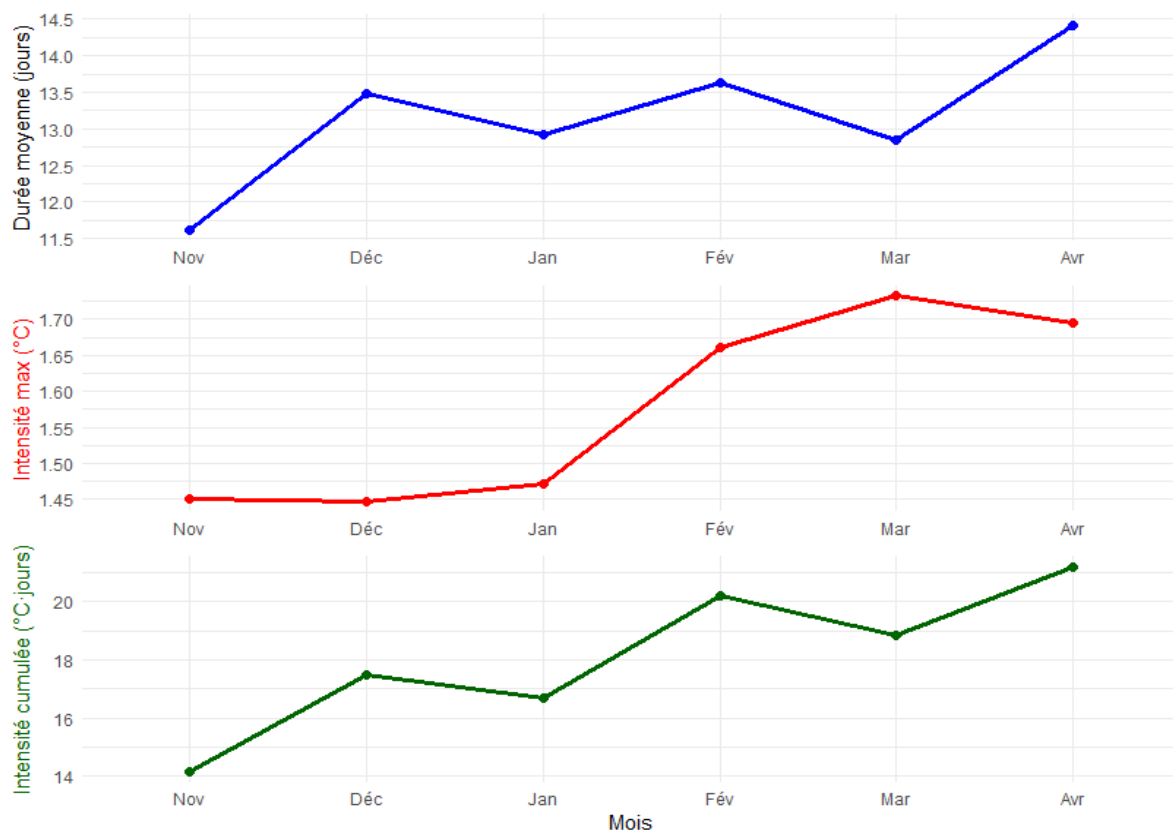
## 3.2 Variation intra-saisonnière des vagues de chaleur marine de 1982 - 2019

Dans cette partie, nous avons fait une étude des caractéristiques des vagues de chaleur marine selon leurs variations en hiver (Novembre à Avril) et en été (Mai à Octobre).

### 3.2.1 Variation intra-saisonnière en hiver (novembre - avril)

La figure 3.7 illustre la variation intra-saisonnière des caractéristiques des VCM en hiver. Elle montre que l'intensité cumulée et la durée des VCM augmentent entre les mois de Novembre et Décembre, entre Janvier et Février et entre Mars et Avril, mais diminuent entre les mois de décembre et Janvier et entre Février et Mars. Cependant l'intensité maximale augmente légèrement durant toute la saison d'hiver avant de diminuer entre Mars et Avril. Quant à l'intensité moyenne, on observe une diminution rapide de novembre à janvier et de mars à avril, mais une augmentation rapide est observée entre janvier et mars.

Variation intra-saisonnière des VCM en hiver (novembre à avril)



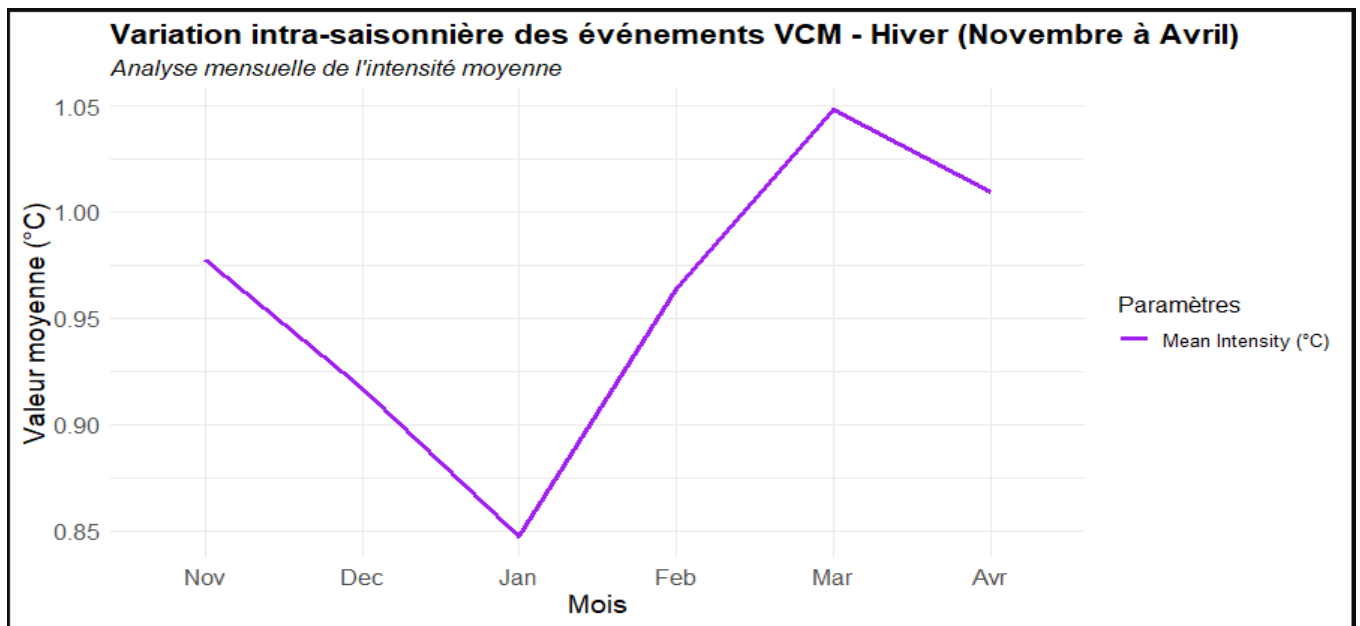


Figure 3.7 : Variation intra-saisonnière des caractéristiques des VCM en hiver sur la période allant de 1982 à 2019.

### 3.2.2 Variation intra-saisonnière en été (mai - octobre)

Pour la variation intra-saisonnière des VCM en été, la figure 3.8 montre que l'intensité cumulée et la durée des VCM diminuent fortement entre mai et juin, ensuite elles suivent une diminution légère entre juin et septembre et enfin une légère augmentation entre septembre et octobre. Cependant l'intensité maximale a une diminution notée durant quasiment toute la saison d'été mais une légère augmentation est notée entre Juin et Août. Quant à l'intensité moyenne, on a des phases de diminution notées de mai à juillet et de septembre à octobre, mais une phase d'augmentation est notée entre août et septembre après avoir suivi une phase relativement constante entre juillet et août.

### Variation intra-saisonnière des VCM en été (mai à octobre)

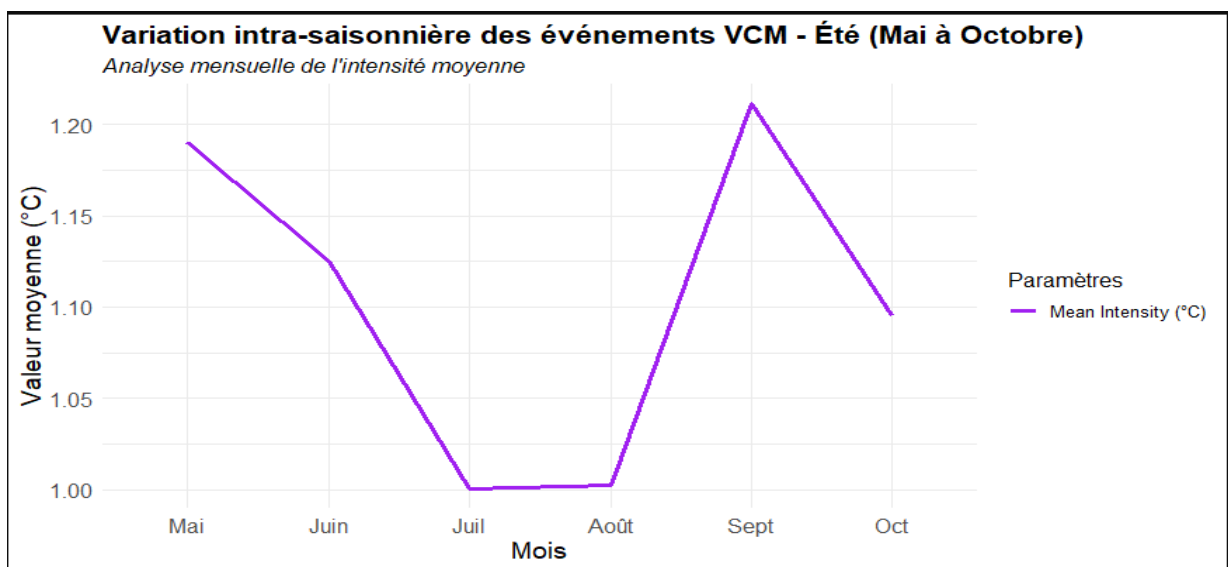
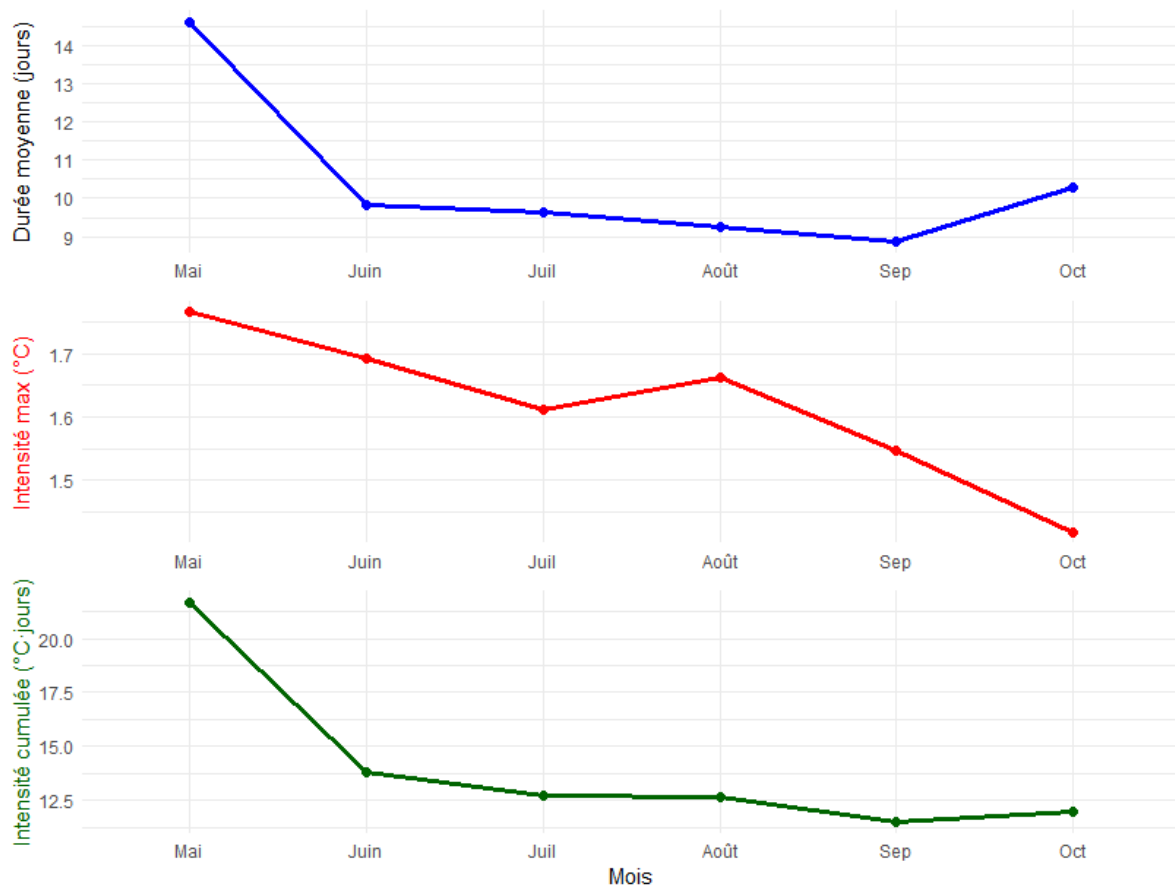


Figure 3.8 : Variation intra-saisonnière des caractéristiques des VCM en été sur la période allant de 1982 à 2019.

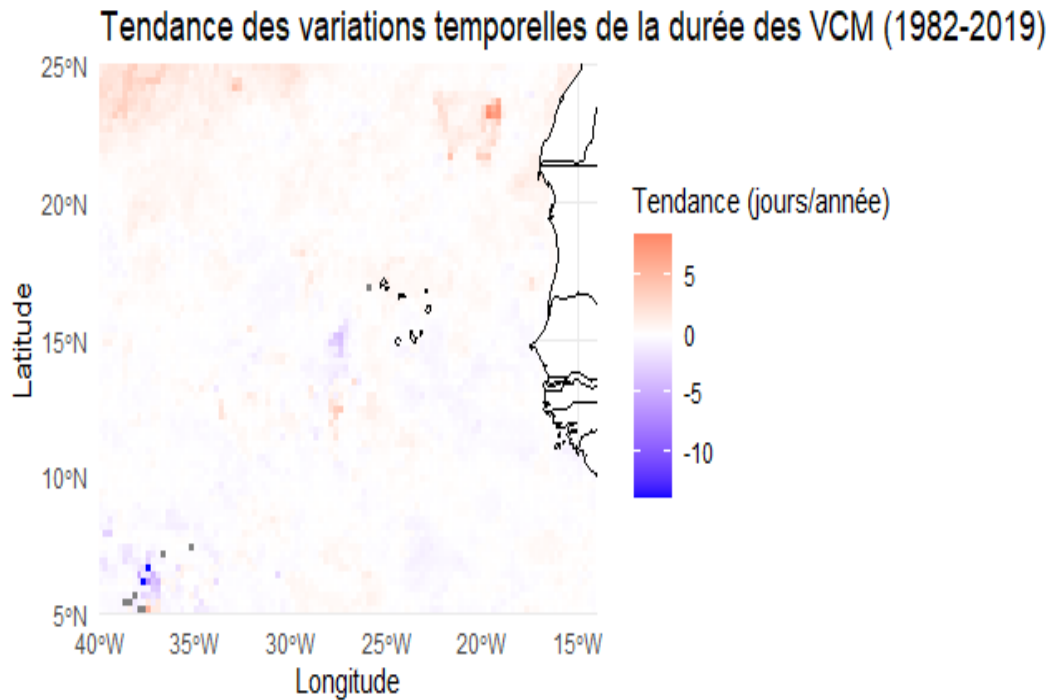
D'après ces études faites sur les caractéristiques des vagues de chaleur marine, on peut en déduire que la hausse notable de celles-ci se produit le plus souvent en hivers. IL se pourrait que pendant ces périodes, les événements responsables du déclenchement ou de l'accentuation des VCM soient beaucoup plus fréquents en hiver qu'en été. Nos résultats sont d'une part en conformité avec les travaux de (Gao, Z et al., 2023) qui attestent que les processus dynamiques océaniques jouent le rôle principal en hiver.

### **3.3 Tendances des variations temporelles des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019**

Afin de comprendre comment les vagues de chaleur marine se propagent dans cette zone d'étude, nous avons analysé les tendances pour chaque indice (caractéristiques) des VCM. Les tendances des variations temporelles pour la durée moyenne, l'intensité cumulée moyenne, l'intensité moyenne et l'intensité maximale moyenne des VCM sur une période de 1982-2019, sont illustrées dans le paragraphe suivant

#### **3.3.1 Tendances des variations temporelles de la durée des vagues de chaleur marine**

La figure 3.9 met en évidence la tendance des variations temporelles de la durée des vagues de chaleur marine. On observe une variation de la tendance de la durée des VCM entre -15 et 10 jours par an. Le signe négatif indique une diminution de la durée des VCM, tandis que le signe positif indique une augmentation de la durée. L'analyse spatiale de la tendance montre que la durée des VCM augmente en allant du sud vers le nord, avec des augmentations notées vers le Nord-Ouest mais avec un maximum enregistré vers le Nord-Est près des régions côtières, avec une valeur de 10 jours et une diminution maximale de 15 jours notée dans le Sud-Ouest.



*Figure 3.9 : Tendance des variations temporelles de la durée des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.*

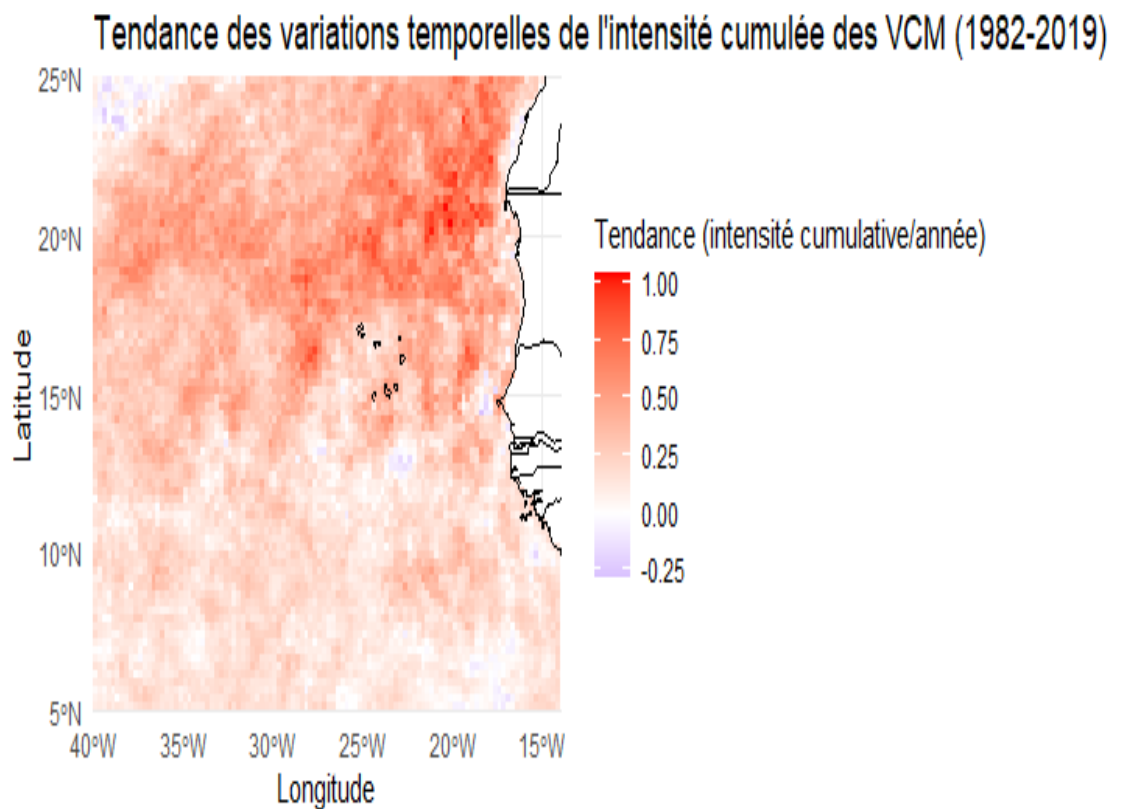
### **3.3.2 Tendance des variations temporelles de l'intensité cumulée, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale des vagues de chaleur marine.**

Ce paragraphe présente les tendances des variations temporelles de l'intensité cumulée, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale. La plage de variation de la tendance de l'intensité cumulée est entre  $-0,25$  et  $1^{\circ}\text{C}$  par an. Comme on vient de le voir précédemment, le signe négatif signifie une diminution de l'intensité cumulée des VCM alors que le signe positif signifie une augmentation. La figure 3.10 montre que l'intensité cumulée a une tendance qui augmente en allant du Sud vers le Nord avec des valeurs plus grandes vers le Nord-Est pouvant aller jusqu'à  $1^{\circ}\text{C}$  par an. On observe les intensités cumulées les plus basses vers le Nord-Ouest, avec une diminution de  $0,25^{\circ}\text{C}$  par an.

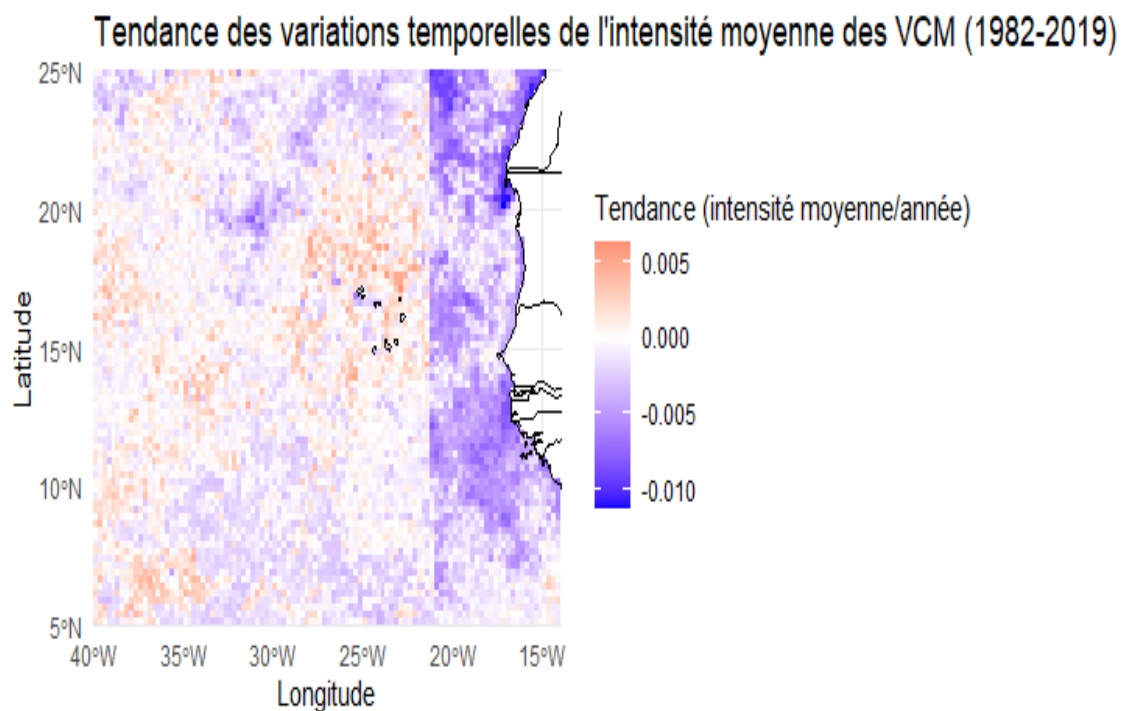
La plage de variation de l'intensité moyenne est entre  $-0,01$  et  $0,005^{\circ}\text{C}$  par an et elle est représentée sur la figure 3.11. Elle illustre que la tendance des variations temporelles des intensités moyennes des VCM est plus élevée dans les régions centrales et dans certaines vers l'Ouest, avec une augmentation de  $0,005^{\circ}\text{C}$ . Elles sont plus faibles dans les régions côtières

avec une diminution pouvant aller jusqu'à  $0,01^{\circ}\text{C}$  dans toute la partie longitudinale allant de  $-20^{\circ}$  à  $-14^{\circ}$ .

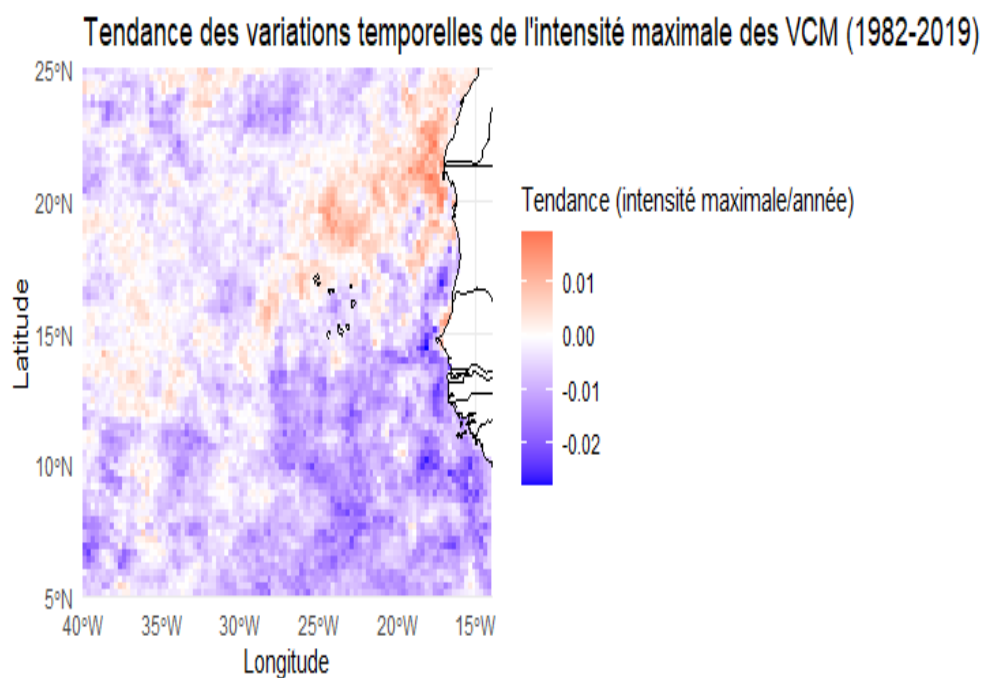
La figure 3.12 illustre la variation de l'intensité maximale entre  $-0,03^{\circ}\text{C}$  et  $0,02^{\circ}\text{C}$ . Elle montre que les intensités maximales des vagues de chaleur marine ont des augmentations plus notées dans les régions côtières du Nord-Est, avec des valeurs pouvant aller jusqu'à  $0,02^{\circ}\text{C}$ . La diminution des intensités maximales les plus faibles est notée dans certaines régions côtières du Sud-Est avec des valeurs pouvant aller jusqu'à  $0,03^{\circ}\text{C}$ .



*Figure 3.10 : Tendance des variations temporelles de l'intensité cumulée des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019*



*Figure3.11 : : Tendance des variations temporelles de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.*



*Figure3.12 : Tendance des variations temporelles de l'intensité maximale des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.*

Il est clair que les régions côtières connaissent des augmentations plus importantes de la durée moyenne, de l'intensité cumulée moyenne et de l'intensité maximale moyenne des VCM. Donc cela pourrait être due au fait que le courant du Gulf Stream distribue les masses d'eau chaude depuis le golfe du Mexique vers le nord de l'océan Atlantique ou aussi l'influent des conditions atmosphériques importantes comme les périodes prolongées de haute pression (anticyclone), mais également en allant vers le nord on tend vers des saisons de chaleur courte et qui peuvent être intenses et ensuite, les échanges de chaleur dans les zones continentales et les eaux côtières, mais également en tenant compte des événements extrêmes pouvant affecter ces zones, comme des événements tels qu'El Niño, ou l'oscillation de l'Atlantique du nord, même si son effet est indirect, on peut dire que, dans ces zones, plus le dérèglement climatique devient intense, plus les masses d'eau accumulent beaucoup de chaleur, contribuant ainsi à l'intensification des vagues de chaleur marine, rendant ainsi ces zones plus vulnérables aux VCM. La tendance des variations temporelles de l'intensité moyenne montre que les vagues de chaleur marine dans cette zone d'étude ont une augmentation importante en intensité moyenne dans certaines régions centrales et en allant vers l'ouest. Donc cela pourrait être due au fait que le large dans cette zone soit marqué par des variabilités de chaleur pouvant engendrer des VCM à courte durée mais intenses. De manière générale, les VCM dans cette zone d'étude ont une tendance qui augmente du Sud vers le Nord. Cela est en conformité avec les travaux de (Li, Z et al., 2023).

Comme nous venons de voir comment les VCM évoluent dans cette zone d'étude, nous allons rapidement examiner comment elles y sont réparties.

### **3.4 Répartition des caractéristiques des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.**

Dans cette section, nous allons caractériser la dispersion spatiale de chaque indice des vagues de chaleur marine dans la zone d'étude. Cela nous permettra d'identifier les régions les plus affectées par ces événements de VCM. En effet, la répartition de la durée moyenne, de l'intensité cumulée moyenne, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne est cartographiée et représentée respectivement dans les figures 3.13 - 3.16.

#### **3.4.1 Répartition spatiale de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.**

La durée moyenne varie de 0 à 60 jours. La figure 3.13 montre que les VCM durent plus longtemps dans les régions du Nord-Ouest et dans quelques régions côtières du Nord-Est. Ces VCM ont une durée pouvant aller jusqu'à 60 jours. Cependant, les VCM de durée moyenne dominante dans cette zone d'étude avec des durées de 20 à 40 jours.

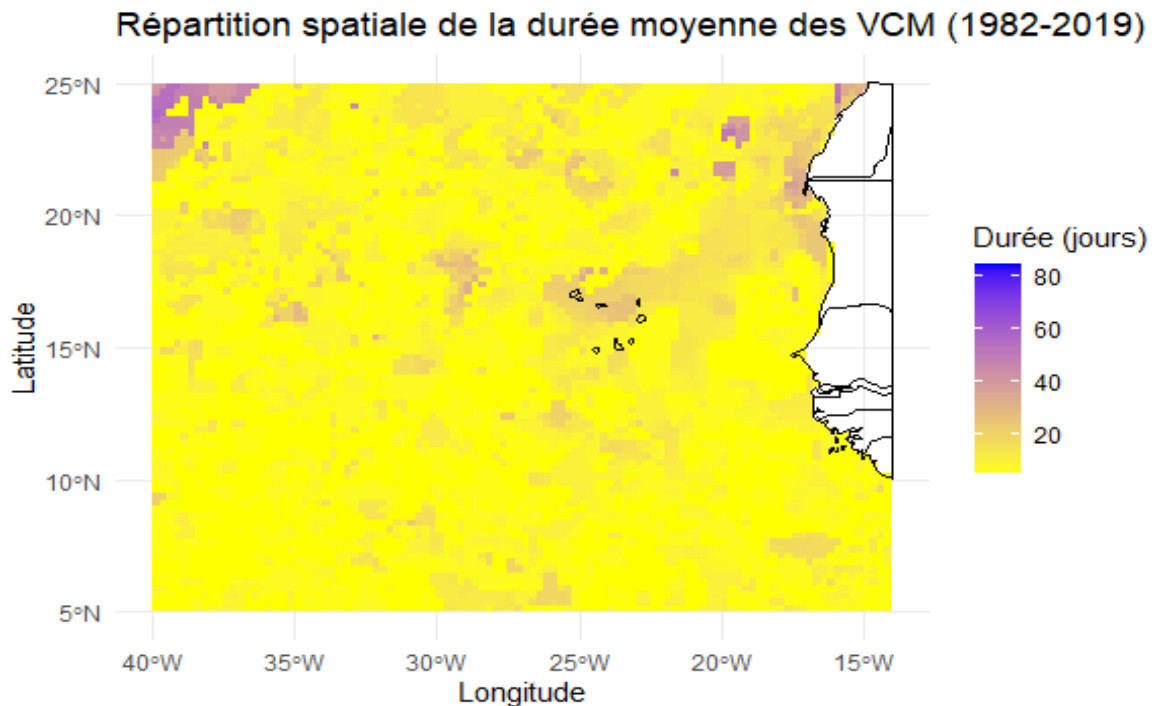


Figure 3.13 : Répartition spatiale de la durée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.

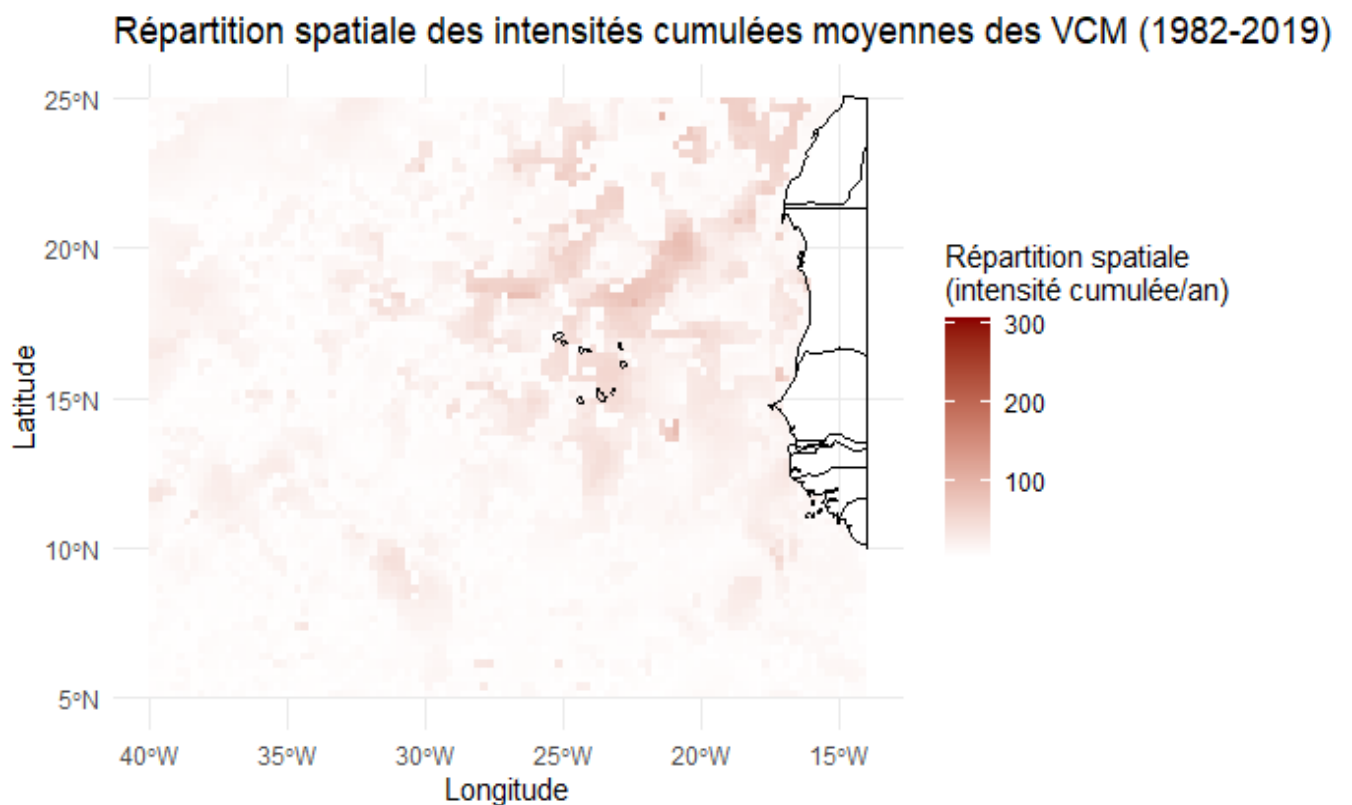
### **3.4.2 Répartition spatiale de l'intensité cumulée moyenne, de l'intensité moyenne et de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.**

L'intensité cumulée moyenne varie entre 0 et 300°C par an et son illustration est donnée par la figure 3.14. En effet, elle montre que certaines zones du Nord-Est et de la région centrale, qui sont proches des côtes, sont plus importantes en intensité cumulée moyenne et peuvent aller jusqu'à 150°C par an. Tandis que la majorité des zones ont des intensités cumulées moyennes relativement faibles, avec des valeurs pouvant aller jusqu'à 50 °C par an.

La figure 3.15 montre que l'intensité moyenne varie entre 1 et 1,3 °C. On constate qu'elle est moins élevée dans des régions centrales et vers le Sud-Ouest. Mais sa valeur maximale a été

enregistrée vers le Sud-Ouest avec une valeur de plus de 1,2 °C par an. Cependant, la quasi-totalité des intensités moyennes les plus importantes sont notées vers les régions côtières pouvant aller jusqu'à plus de 1,1°C.

En ce qui concerne l'intensité maximale moyenne, elle fluctue entre 0 et 5 °C par an. La figure 3.16 montre que les VCM les plus intenses dans la zone d'étude se situent vers les régions côtières avec des intensités maximales moyennes allant jusqu'à presque 5°C . La majorité de la zone est dominée par des intensités maximales moyennes, avec des valeurs allant de 1 à 3°C.



*Figure 3.14 : Répartition spatiale de l'intensité cumulée moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.*

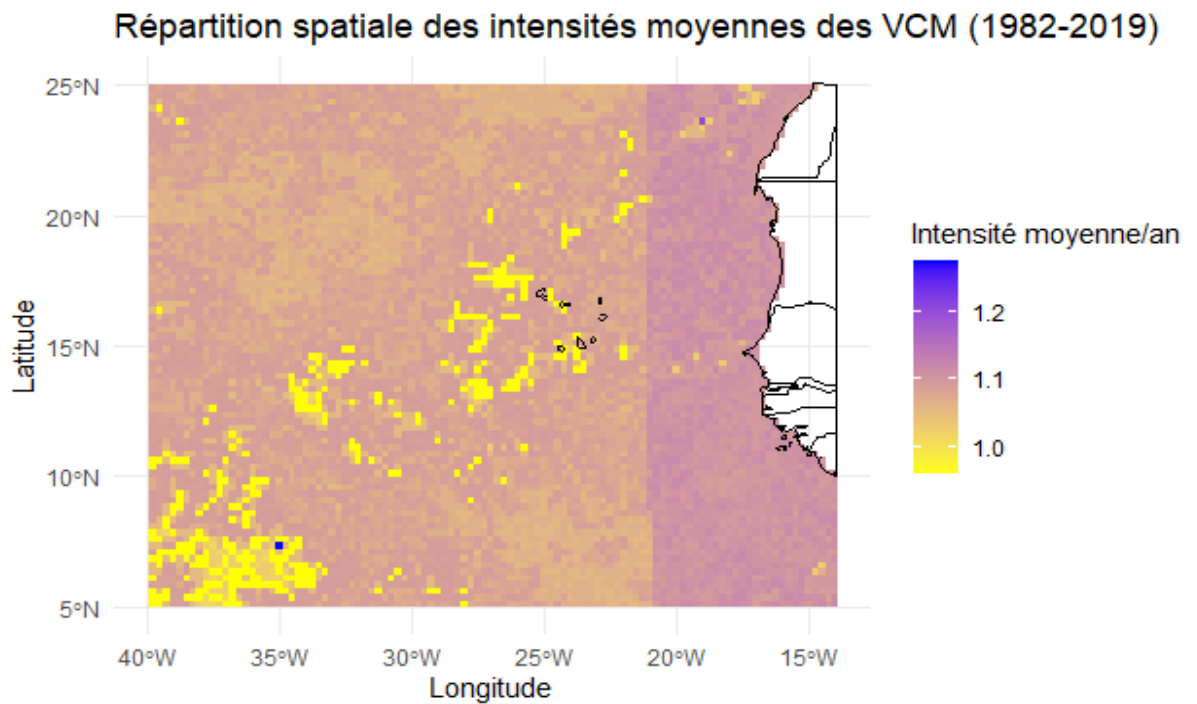


Figure3.15 : Répartition spatiale de l'intensité moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.

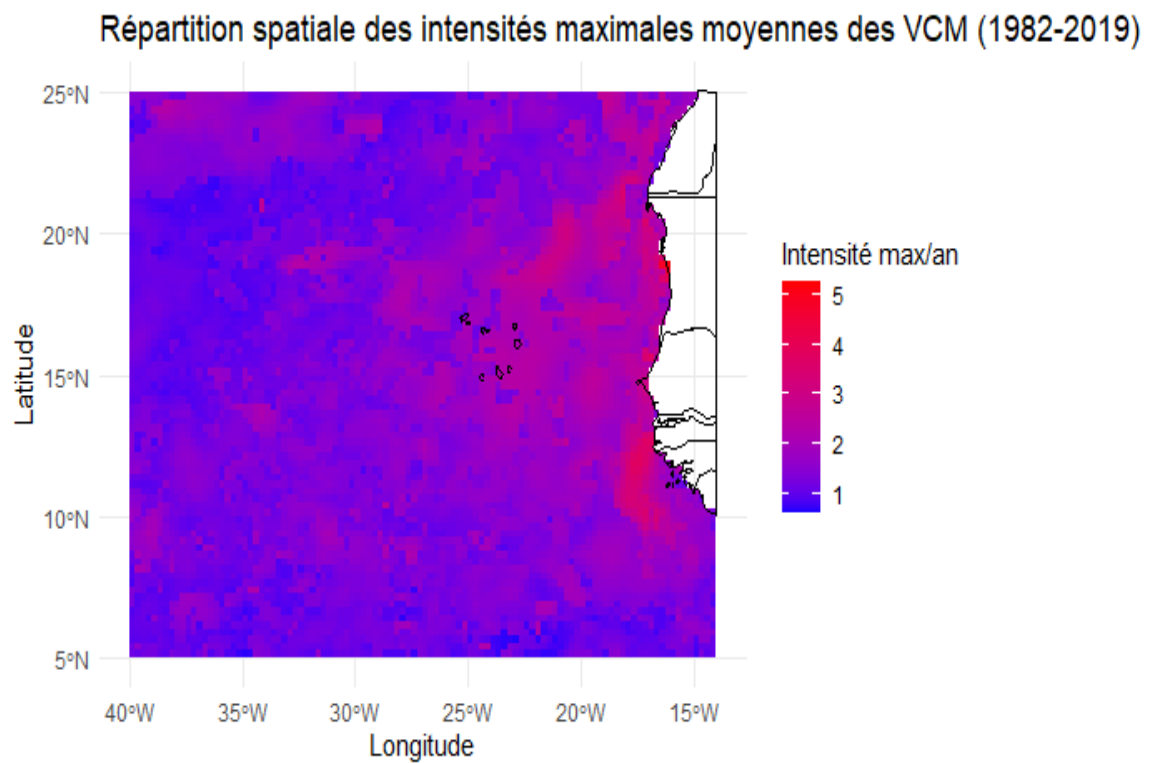


Figure3.16 : Répartition spatiale de l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.

Donc, la plupart de ces caractéristiques des vagues de chaleur marine ont des valeurs plus élevées dans les régions côtières. Elle pourrait être due au fait que dans les zones côtières la température y est plus intense en raison de moins d'évaporation et plus de conservation de chaleur par les masses d'eau. Nous allons confirmer ces résultats par la présentation de la thermodynamique entre l'océan et l'atmosphère.

### **3.5 Elévation de la mer et répartition spatiale de la chaleur latente et sensible dans la zone spécifiée.**

#### **3.5.1 Elévation de la mer dans cette zone d'étude**

La plage de variation de l'élévation de la mer dans cette zone est de -7500 à 2500m. Les valeurs négatives indiquent les profondeurs, tandis que celles qui sont positives indiquent au-dessus de la surface de la mer.

La figure3.17 illustre l'élévation de la mer dans notre zone d'étude et montre que plus on se rapproche des côtes, plus la profondeur diminue. En effet, en quittant des régions côtières, de l'Est vers l'Ouest, on observe des zones plus profondes pouvant aller jusqu'à 7500m de profondeur. En effet, la grande étendue de couleur violet foncé (-7500m) pourrait être la présence de plaine abyssale. Les couleurs vertes et jaunes dans l'océan pourraient être dues à la présence d'un mont sous-marin.

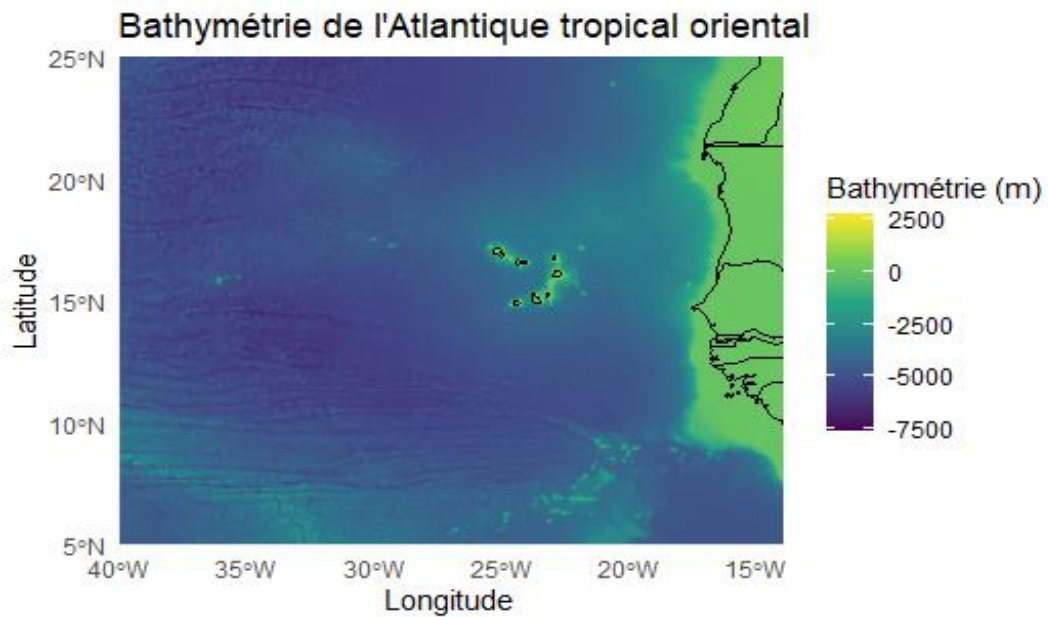


Figure 3.17 : Bathymétrie de la mer dans l'océan atlantique tropical oriental plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes allant de  $-40^{\circ}$  à  $-14^{\circ}$  et des latitudes allant de  $5^{\circ}$  à  $25^{\circ}$ .

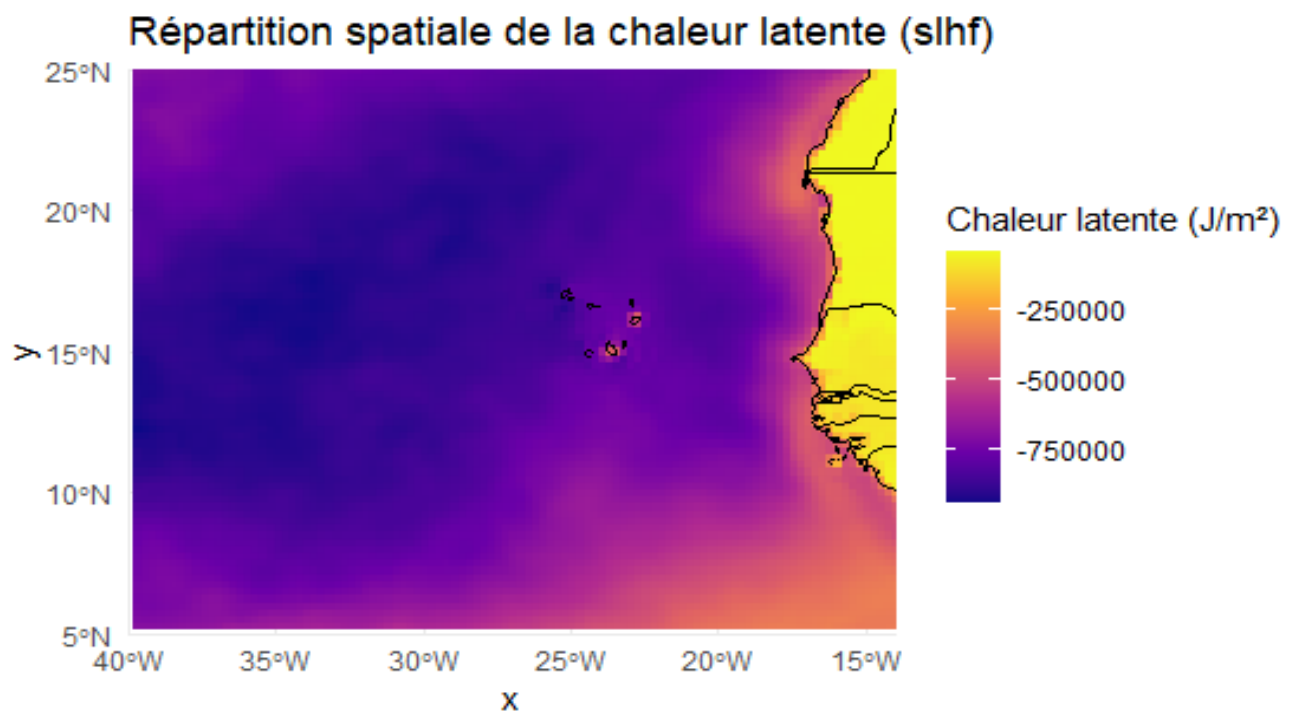
### 3.5.2 Répartition spatiale de la chaleur latente et sensible dans cette zone spécifiée

Dans ce paragraphe, nous avons représenté la répartition de la chaleur latente et sensible pour avoir une idée sur la thermodynamique entre l'océan et l'atmosphère dans les zones côtières et au large de notre zone d'étude. Sur ce, la figure 3.18 illustre la répartition spatiale de la chaleur latente et montre que la plage de variation de la chaleur latente est comprise entre  $-1.000.000 \text{ J/m}^2$  et  $-250.000 \text{ J/m}^2$ . Elle montre qu'elle est négative dans cette zone. Cela dit, l'océan cède de la chaleur à l'atmosphère par évaporation. Cependant, on note également que dans les régions côtières, la chaleur cédée par l'océan y est moins importante qu'au large. Comme le transfert se fait par évaporation et vu qu'il y a moins d'évaporation dans les régions côtières, alors il se pourrait que dans ces régions la température y est plus importante.

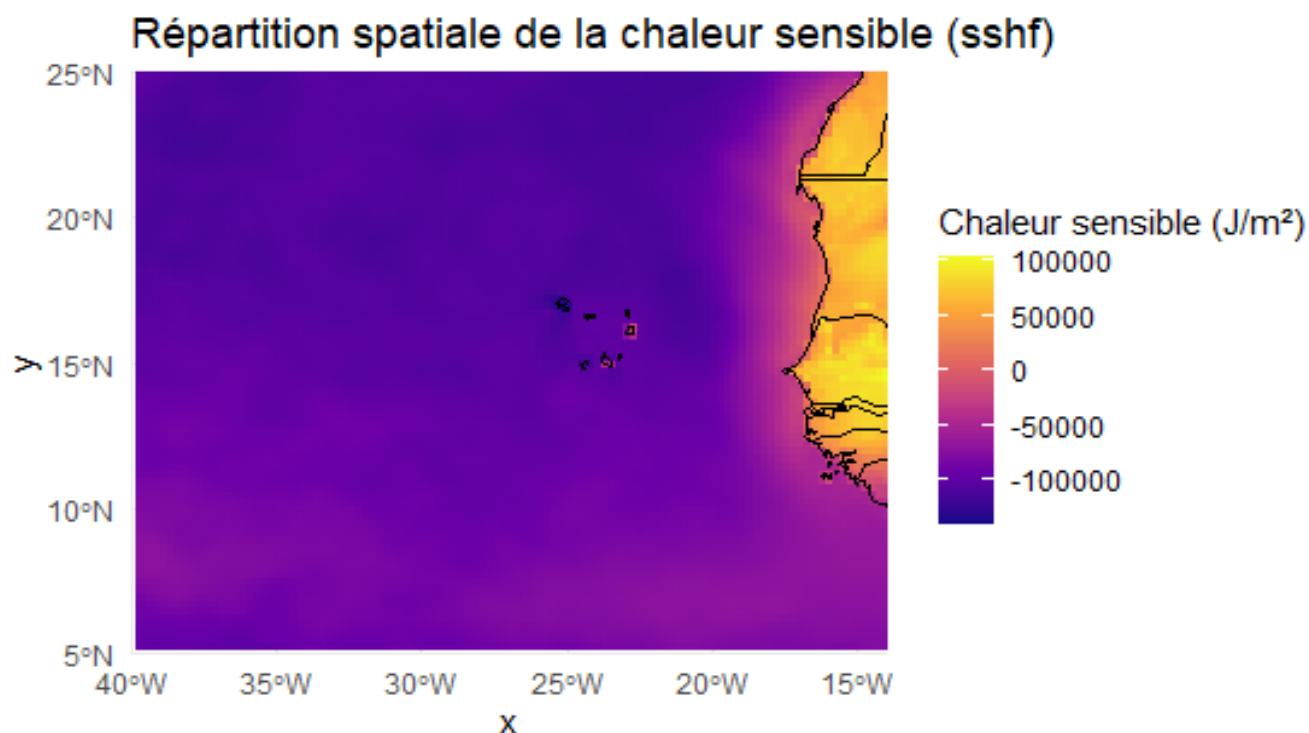
La figure 3.19 montre que la plage de variation de la chaleur sensible est comprise entre  $-100.000$  et  $100.000 \text{ J/m}^2$ . Cette carte montre que dans notre zone, la chaleur sensible y est négative. Cela dit, l'océan cède de la chaleur à l'atmosphère par conduction et par convection. Cependant, la chaleur cédée est moins importante dans les régions côtières. Comme le transfert se fait par

conduction et convection et vu que ceci est moins important dans les régions côtières, alors il se pourrait que les masses d'eau dans ces régions conservent plus de chaleur.

Comme les régions côtières conservent plus de chaleur, en plus qu'il y ait moins d'évaporation dans ces régions, alors qu'elles reçoivent beaucoup de chaleur car étant moins profondes. Donc elles sont plus chaudes qu'aux larges. Ceci confirme nos résultats sur le fait que d'après la répartition spatiale, les VCM ont des caractéristiques plus importantes dans les régions côtières.



*Figure3.18 : Répartition spatiale de la chaleur latente dans l'océan atlantique plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes(x) de -40° à -14°et des latitudes(y) allant de 5° à 25°.*



*Figure 3.19 : Répartition spatiale de la chaleur sensible dans l'océan atlantique plus précisément dans la zone délimitée par des longitudes(x) de  $-40^\circ$  à  $-14^\circ$  et des latitudes(y) allant de  $5^\circ$  à  $25^\circ$ .*

### **3.6 Fréquence et probabilité d'apparition des vagues de chaleur marine dans la zone d'étude.**

Nous avons complété ce travail par la fréquence et la probabilité d'apparition des catégories de vague de chaleur marine. En effet, la fréquence des VCM est représentée par la figure 3.20 et la probabilité des VCM par la figure 3.21.

#### **3.6.1 Fréquences des catégories de VCM dans la zone d'étude sur une période de 1982-2019.**

La plage de variation des fréquences de VCM est entre 0 et 7000 comptes. La figure 3.20 montre que dans la zone d'étude, les VCM de catégorie faible sont plus fréquentes avec une occurrence de 6645 comptes. Les VCM de catégorie modérée s'en suivent avec une occurrence de 630

comptes. Les VCM les plus rares sont ceux de catégories fortes et extrêmes, avec une occurrence respective de 69 et 17 comptes.

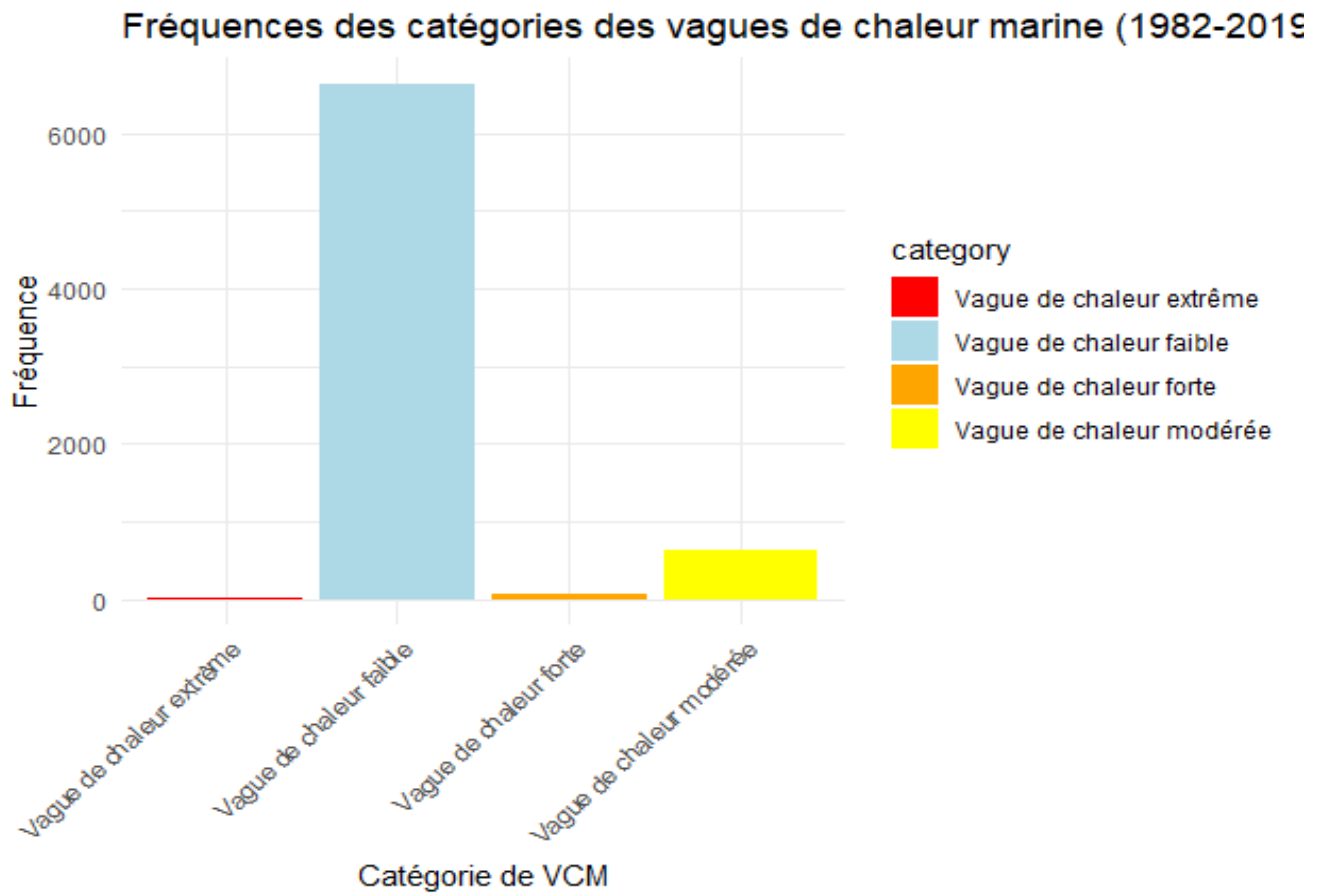


Figure3.20 : Fréquence des catégories de vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.

### 3.6.2 Probabilités d'apparition des catégories de VCM dans la zone d'étude sur une période de 1982-2019.

La plage de probabilité pour qu'une catégorie de vague de chaleur marine apparaisse est entre 0 et 1. La figure3.21 montre que les VCM de catégorie faible ont une probabilité d'apparition de 0,9 dans toute la durée de la période allant de 1982-2019. Pour celles de catégories modérées, est de à peu près 0,086. Enfin, pour celles de catégories fortes et extrêmes, sont respectivement de 0,009 et 0,002.

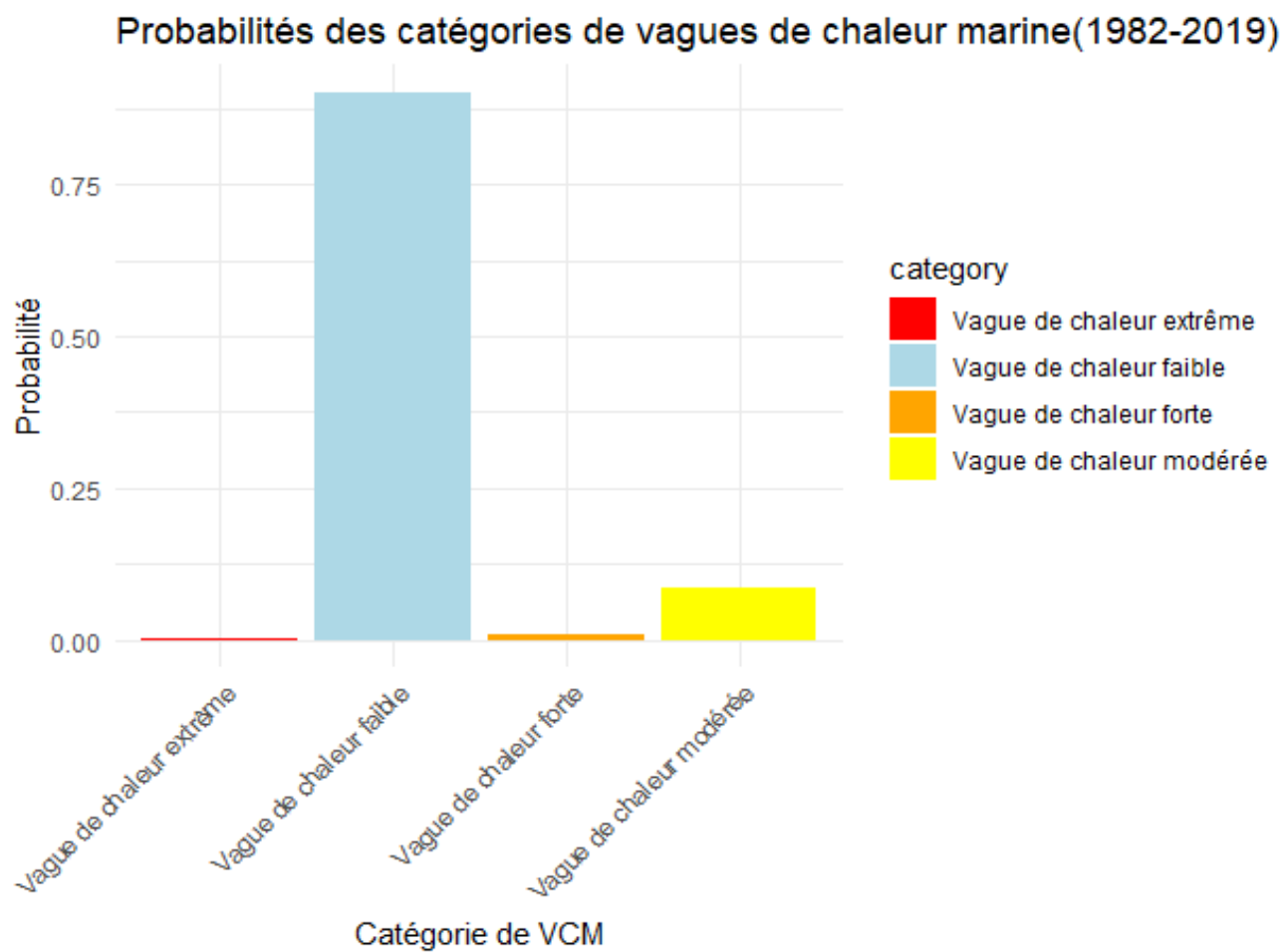


Figure3.21 : Probabilité des catégories de vagues de chaleur marine sur une période de 1982-2019.

## Conclusion et Perspective

Ce travail vise à mieux comprendre les vagues de chaleur marine dans l'Atlantique Oriental. Il montre que depuis 2013, la durée moyenne, l'intensité cumulée moyenne et l'intensité maximale moyenne des vagues de chaleur marine augmentent, tandis que l'intensité moyenne reste relativement stable avec des variations plus marquées. Ces vagues de chaleur sont plus fréquentes en hiver.

Concernant leurs répartitions et leur tendance des variations temporelles, elles sont plus intenses et durent plus longtemps en allant du Sud vers le Nord, avec des valeurs maximales près des côtes africaines. L'intensité moyenne, elle, est plus forte au large qu'au niveau des côtes. Certaines régions côtières présentent des vagues de chaleur plus intenses, mais des zones du Nord-Ouest enregistrent aussi de longues durées.

Les vagues de chaleur marines de faible intensité sont les plus courantes, avec une forte probabilité d'apparition (0,9). Les vagues modérées, fortes ou extrêmes sont plus rares. Cependant, même les vagues de chaleur de faible intensité peuvent avoir un impact sur l'écosystème marin. Elles peuvent perturber la chaîne alimentaire et avoir des conséquences économiques, sanitaires et sociales.

Face à ce défi, il est essentiel de mieux comprendre les interactions entre l'océan et l'atmosphère pour identifier les causes principales des vagues de chaleur marines et limiter leurs effets. Des études approfondies sur les modèles prédictifs (comme le CMIP) pourraient aider à mieux protéger l'écosystème marin. De plus, analyser le comportement des espèces marines face à ces changements permettrait de développer des stratégies d'adaptation.

## Bibliographie

- Boudry, P. Fleury, E., Le Roux, F., Zambonino, J. (2021). *Rapport d'activité 2018-2019 - Unité RBE/PFOM*. Ifremer. Physiologie Fonctionnelle des Organismes Marins, 80 p.
- Beucher, F. (2010). Variabilité de l'Atlantique tropical. : Météo-France. ISBN : 978-2-11-099391-5 pp 213-227.
- Boulet-Gercourt, P. (8 août 2021). Climat : David Keith, le chercheur d'Harvard qui voulait dompter le Soleil. *Le Monde*, [https://www.lemonde.fr/climat/article/2021/08/08/david-keith-le-chercheur-d-harvard-qui-voulait-dompter-le-soleil\\_6094240\\_1653054.html](https://www.lemonde.fr/climat/article/2021/08/08/david-keith-le-chercheur-d-harvard-qui-voulait-dompter-le-soleil_6094240_1653054.html).
- Carignan, M.-H. (2020). *Canicule dans l'Arctique : le réchauffement climatique pourrait-il protéger Calanus glacialis de ces événements extrêmes ? Une étude de l'effet de la température sur le métabolisme énergétique d'une espèce-clé de l'Arctique* (Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski), 95 p.
- Chiffres clés du climat : France, E. e. (2022). *Ministère de la Transition Écologique, France*. Paris: La Documentation française,.
- Climat, P. O. (2015). *Océan et Climat – Fiches scientifiques*. Paris: Plateforme Océan et Climat, 9 p.
- Climat, S. L. (2008). *Comment réduire les gaz à effet de serre (vraiment)*. Sauvons Le Climat, 71 p.
- David, M., Cantat, O., & Gérard, É. (2022, juillet). L'îlot de fraîcheur du Cotentin (Normandie) : un eldorado de l'adaptation aux canicules. *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (AIC Toulouse 2022)*,. Toulouse, France: Association Internationale de Climatologie (AIC), p.8.
- de Bettignies, T. (2019). *Les vagues de chaleur marines*. Paris: Delachaux & Niestlé ; Muséum national d'Histoire naturelle. 978-2-603-02625-0, p. 156-157.
- De Muelenaere, M. (2019, 29 août). Les clés pour comprendre l'Anthropocène. *Le Soir*, p. 9.
- Gao, Z., Jia, W., Zhang, W., & Wang, P. (2023). Étude sur les caractéristiques saisonnières et les causes des vagues de chaleur marines dans la mer de Chine méridionale sur près de 30 ans. *Atmosphere*, 14(12), 1822, 18 p.
- Grimmelpont, M. (2023). Réponses physiologiques et comportementales des organismes marins exposés aux vagues de chaleur marines et aux écrans solaires. *Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, Sciences agricoles*. NNT : 2023LAROS002. HAL Id : tel-04211032, 273. p.
- Guilyardi, É. (2001, mai). Quand le sel de l'océan pimente le climat. *La Météorologie*, n° 33, p. 34-44.

- Li, Z., Wan, L., Liu, Y., Wang, Z., & Wu, L. (2023). Analysis of Marine Heatwaves in China's Coastal Seas and Adjacent Offshore Waters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6), 1672, 18. p.
- Matari, A. (2016). Climat et changement climatique. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 6 p.
- Pacifique, A. d. (2004). Assises de la Recherche Française dans le Pacifique - Nouméa, 24 au 27 août 2004. *Actes des Assises de la Recherche Française dans le Pacifique*. Agence de Développement Économique de la Nouvelle-Calédonie (ADECAL), 38 p.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., de Cara, S., Delame, N., et al. (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*. Paris, 92 p.: INRA.
- Pisani-Ferry, J., & Mahfouz, S. (2023). Les incidences économiques de l'action pour le climat. *France Stratégie*, mai, 152 p.
- Platform, O. &. (2024). *Conséquences du changement climatique : les vagues de chaleur marines font peser des menaces durables dans l'océan comme sur terre*. Paris.
- Seguin, B. & Soussana, J. F. (2008). Émissions de gaz à effet de serre et changement climatique : Causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage. . *Courrier de l'environnement de l'INRA*, (55), pp 79-91.
- Sénégal, U. (2022). Inondations au Sénégal : l'UNICEF et ses partenaires au chevet des personnes affectées. *UNICEF*.  
<https://www.unicef.org/senegal/recits/inondations-au-s%C3%A9n%C3%A9gal-lunicef-et-ses-partenaires-au-chevet-des-personnes-affect%C3%A9es>
- Tchoupé Makougoum, C. F. (2018). Changement climatique au Mali : impact de la sécheresse sur l'agriculture et stratégies d'adaptation (Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne). *Université Clermont Auvergne, Centre d'Études et de Recherche sur le Développement International (CERDI)*, 197 p.
- Valérian, F. (2022). Responsabilité & Environnement. *Responsabilité & Environnement"*, série trimestrielle, numéro 106, publié en avril 2022. Paris: Annales des Mines. Conseil général de l'Économie (CGE), Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance, 117 p.
- Cassou, C., & Guilyardi, É. (2007). *Modes de variabilité et changement climatique : Synthèse du quatrième rapport d'évaluation du GIEC*. La Météorologie, n° 59, novembre 2007, 22–30.

Mauger-Parat, M., & Peliz, A. C. (2013). *Controverse, polémique, expertise : trois notions pour aborder le débat sur le changement climatique en France*. VertigO – La revue électronique en sciences de l'environnement, 13(2).

Encyclopaedia Britannica. (2025). *Atlantic Ocean*. Dans *Encyclopaedia Britannica*. Consulté le 29 juin 2025, de Britannica.com

Fedorovsky, B. (2015). *Rôle des industries maritimes pour l'environnement et le climat*. Groupement des industries de construction et activités navales (GICAN). Document présenté à l'occasion de la COP21.

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., ... & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227–238.

Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuisen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H. A., Straub, S. C., & Wernberg, T. (2018). *Longer and more frequent marine heatwaves over the past century*. *Science*, 372(6571), 1210–1214.  
<https://doi.org/10.1126/science.aat2360>

United Nations Environment Programme & UNESCO. (2023). *Weather, climate and the IPCC*. United Nations. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384683>

Hobday, A. J., Oliver, E. C. J., Sen Gupta, A., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2018). *Categorizing and naming marine heatwaves*. *Oceanography*, 31(2), 162–173.  
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>

