



DELphinus MOuvements GESTion

Octobre 2023

Indices environnementaux et
tableau de bord de leurs
déviations rapport à la
climatologie 2000-2020





Durée du projet : 3 ans

Date de lancement : 01/03/2022

Date de fin : 30/06/2025

Coordinateurs de projet : Clara Ulrich, Pierre Petitgas, Jérôme Spitz, Marion Pillet.

Site web : <https://delmoges.recherche.univ-lr.fr>

Livrable

WP concerné : WP2

Responsables du WP : Doray Mathieu (Ifremer)

Livrable L.2.1.1

Date de production : 25 Octobre 2023

Titre : Indices environnementaux et tableau de bord de leurs déviations rapport à la climatologie 2000-2020

Auteurs : Huguet Antoine (Ifremer), Petitgas Pierre (Ifremer), Dorand Marine (Ifremer), Ozanam Baptiste (Ifremer).

Résumé

Depuis les années 1990, la France connaît régulièrement des épisodes de mortalités importantes de dauphins, qui entraînent des pics d'échouages sur le littoral Atlantique en hiver. Depuis 2016, les échouages de petits cétacés dans le golfe de Gascogne présentant des traces de capture, atteignent des niveaux inédits. Si les données scientifiques actuelles permettent d'évaluer globalement le risque induit par ces captures accidentelles pour la conservation de la population de dauphins communs, elles sont toutefois trop lacunaires pour comprendre les déterminants écosystémiques et halieutiques à l'origine de ces captures. En concertation avec l'Office français de la biodiversité, les professionnels de la pêche et l'Etat, La Rochelle Université-CNRS et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) ont construit le projet Delmoges (Delphinus Mouvements Gestion). Il vise, dans un premier temps, à combler ces lacunes en allant chercher des nouvelles données sur les habitats des dauphins, sur leurs interactions trophiques dans l'écosystème et leurs interactions techniques avec les engins de pêche. Ensuite, le projet propose d'intégrer les connaissances sur l'ensemble du socio-écosystème pour envisager une diversité de scénarios de diminution des captures accidentelles incluant des solutions technologiques et, enfin, d'en évaluer les conséquences biologiques et socio-économiques.

Ce livrable présente les travaux effectués sur le golfe de Gascogne concernant la dynamique de plusieurs variables environnementales sur une vingtaine d'années. Les travaux ont porté sur la température et la chlorophylle a. Deux méthodologies ont été employées, l'une utilisant les fonctions empiriques orthogonales, l'autre les modèles linéaires dynamiques. Ces deux approches et les résultats associés sont décrits dans les résumés ci-dessous.

Dynamique de la chlorophylle a dans le golfe de Gascogne et patrons spatiaux associés

L'étude la biomasse phytoplanctonique est fondamentale pour comprendre le fonctionnement de l'environnement marin car elle est à la base de la chaîne alimentaire. Les études globales menées sur le réchauffement climatique semblent montrer notamment dans l'Atlantique Nord une baisse de cette biomasse associée au réchauffement des eaux marines. En utilisant un proxy de la biomasse phytoplanctonique, la concentration en chlorophylle a, on parvient à mobiliser diverses données adaptées à son étude et constituant des séries temporelles longues, allant de la donnée satellite

jusqu'aux flux de nutriments et de débits des fleuves. Dans le golfe de Gascogne, la spatialisation des tendances concernant l'évolution de la chlorophylle *a* met en lumière une baisse généralisée des concentrations de façon significative jusqu'à la limite du plateau continental. Les débits des fleuves, dont les apports ont décru, pourraient être partiellement responsables de cette baisse, mais n'explique pas une spatialisation aussi étendue de ces diminutions, avec un gradient côte-large s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres. Le lien avec le changement global, bien documenté pour la zone, semble central en limitant le développement du phytoplancton par différents phénomènes qui sont discutés.

Mots-clés : golfe de Gascogne ; Chlorophylle *a* ; Modèles Linéaires Dynamiques ; distributions spatiales, tendances

Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle a et de la température dans le golfe de Gascogne

La méthode des EOFs est utilisée depuis longtemps en météorologie et en océanographie physique pour décomposer la variabilité dans le temps et l'espace de séries de cartes. Des cartes satellites de température et de concentration en chlorophylle-a sont par ailleurs fournies quotidiennement par l'océanographie opérationnelle depuis plus de 20 ans. L'analyse EOF a donc été appliquée sur ces données. L'application de la méthode des EOFs sur ces cartes et le regroupement des EOFs calculés a mis en évidence des modèles spatiaux de variabilité auxquels sont associés des séries temporelles d'amplitudes dont certaines ont été quantifiées. La construction de modèles linéaires multiples à l'aide de variables environnementales et la partition de variance ont permis d'expliquer la variabilité des séries d'amplitudes. Ces dernières ont par ailleurs été valorisées en les corrélant avec des variables liées aux niveaux trophiques supérieurs. Nos résultats montrent que les eaux du golfe se réchauffent, notamment le long des côtes françaises en hiver, et dans le Sud-Est du golfe durant les mois de transition sous l'influence majeure de la NAO qui allonge la saison estivale. Parallèlement à cela, le gradient côtier annuel et hivernal de biomasse phytoplanctonique décroît sous l'influence des nutriments et de la structure de la colonne d'eau. Les séries d'indices expliquent certaines variables liées aux niveaux trophiques supérieurs. Néanmoins, les effets relais de variables intermédiaires ne sont pas pris en compte ce qui relativise les interprétations possibles.

Mots-clés : golfe de Gascogne ; Température de surface ; Chlorophylle-a ; Fonctions Orthogonales Empiriques ; Indices Environnementaux

Dissémination

Type de livrable : rapport

Public : Oui

Lieux de stockage : Archimer, site web Delmoges

Consortium scientifique



La Rochelle Université
23 avenue Albert Einstein
BP 33060
17031 La Rochelle

<https://www.univ-larochelle.fr/>



Centre national de la recherche scientifique (CNRS)
3, rue Michel-Ange
75794 Paris cedex 16

<https://www.cnrs.fr/fr>



Institut Français pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer)
1625 route de Sainte-Anne - CS 10070
29280 Plouzané

www.ifremer.fr/



Université
de Bretagne
Occidentale

Université de Bretagne Occidentale (UBO)
3 rue des Archives
CS93837
29238 Brest cedex 3

<https://nouveau.univ-brest.fr/>



Comité National des Pêches Maritimes et des Elevages Marins (CNP MEM)
134 avenue de Malakoff
75116 Paris

<https://www.comite-peches.fr/>

Table des matières

1	Contexte	6
1.1	Contexte environnemental et scientifique.....	6
1.2	Rôle du livrable	6
1.3	Structure du document	6
2	Dynamique de la chlorophylle a dans le golfe de Gascogne et patrons spatiaux associés	7
2.1	Introduction	7
2.2	Données et méthodes	8
2.2.1	Zone d'étude	8
2.2.2	Données de flux et de nutriments.....	10
2.2.3	Données satellite.....	11
2.2.4	Méthode.....	11
2.3	Résultats	13
2.3.1	Analyse des débits des fleuves.....	13
2.3.2	Analyse des flux annuels de nutriments	15
2.3.3	Distribution spatiale des changements dans la concentration de chlorophylle a	16
2.4	Discussion	21
2.5	Conclusion	24
3	Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle a et de la température dans le golfe de Gascogne	25
3.1	Introduction	25
3.2	Principaux résultats	26
3.3	Principales conclusions.....	27
4	Bibliographie	28
5	Annexes	33

1 Contexte

1.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET SCIENTIFIQUE

À partir des données environnementales 1) satellite, 2) in-situ, 3) météorologiques, 4) débits des fleuves, 5) issues de l'océanographie opérationnelle (e.g. ERA5) 6) et des grands indices atmosphériques, (e.g. NAO, AMO). L'objectif de ce workpackage est de cartographier les variables forçantes et la production biologique dans les bas niveaux trophiques et identifier les grandes tendances et changements intervenus dans l'écosystème du golfe du Gascogne sur les 20 dernières années.

Le travail s'est décomposé en deux grandes actions :

- L'encadrement de deux stages de master 2 sur le sujet suivant : « Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle a et de la température par Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) dans le golfe de Gascogne »
- La mise en place à l'échelle du golfe de Gascogne de routine de traitements sur la base de l'imagerie satellitaire permettant de produire des cartographies de la chlorophylle a sur toute la zone, agrégées à différentes échelles et de les utiliser en entrées de modèles linéaires dynamiques pour calculer des tendances désaisonnalisées.

1.2 ROLE DU LIVRABLE

Ce livrable a pour objet de donner un contexte des tendances et de l'évolution de deux paramètres environnementaux majeurs sur le golfe de Gascogne : la chlorophylle a comme proxy de la biomasse phytoplanctonique et la température. Le phytoplancton formant la base de la chaîne alimentaire marine, son évolution et les tendances associées pourraient expliquer les comportements des plus hauts niveaux trophiques. Les autres travaux du WP2 pourront ainsi s'appuyer sur ces travaux pour alimenter leurs modèles et/ou expliquer des phénomènes spécifiques liés aux autres niveaux trophiques, comme des déplacements de communautés.

1.3 STRUCTURE DU DOCUMENT

Ce document comporte deux parties distinctes :

- Une présentation de la dynamique générale de la chlorophylle a à l'échelle du golfe de Gascogne,
- Une synthèse des résultats des rapports de stage de Master 2 de Baptiste Ozanam et Marine Dorand, rapports disponibles par ailleurs en libre consultation.

2 Dynamique de la chlorophylle *a* dans le golfe de Gascogne et patrons spatiaux associés

2.1 INTRODUCTION

Exposés au changement climatique et aux pressions anthropiques, les écosystèmes marins peuvent évoluer de façon soudaine en basculant brusquement d'un état à un autre (Scheffer *et al.*, 2001). De tels basculements, ou changements de régime, ont déjà été observés et sont généralement liés à des changements prononcés dans les forçages hydrométéorologiques à grande échelle (Woillez *et al.*, 2010). Ils entraînent des réorganisations structurelles et fonctionnelles, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur les espèces à travers toute la chaîne alimentaire (Beaugrand *et al.*, 2008). Identifier et décrire les mécanismes gouvernant de tels changements est une démarche complexe puisqu'elle nécessite la confrontation de phénomènes et de processus qui se déroulent à des échelles d'espace, de temps et d'organisation écologique très différente (Scheffer *et al.*, 2001). La plupart des changements de régime ont été attribués à des modifications à grande échelle de l'environnement physique qui peuvent ensuite se répercuter sur les niveaux trophiques supérieurs par un effet en cascade *bottom-up* (Pershing *et al.*, 2015). Le suivi de paramètres physiques et de bas niveaux trophiques permet donc de détecter les changements de régimes et d'anticiper de potentielles cascades trophiques. Dans le contexte du changement climatique et de l'exploitation croissante des ressources marines, un tel suivi constitue un apport majeur pour développer un modèle de gestion durable des écosystèmes marins en permettant de comprendre les variations observées dans les niveaux trophiques supérieurs (Conversi *et al.*, 2015).

Au cours des dernières décennies, l'Atlantique Nord s'est réchauffé plus rapidement que tout autre océan. Cette partie relativement petite de l'océan mondial serait responsable d'un tiers de l'augmentation du réchauffement global de 1955 à 1998 (Levitus *et al.*, 2005). Ce réchauffement anormal correspond à une augmentation de la température de 0,27°C sur les 700 m supérieurs de la colonne d'eau, de 1955 à 2003. La continuité de la tendance est difficile à analyser, car elle se superpose à des oscillations pluriannuelles. A une échelle plus régionale, le golfe de Gascogne est touché par ces phénomènes ; il est d'autre part affecté par divers processus physiques, qui agissent sur une grande variété d'échelles spatiales. Le courant polaire ibérique (IPC), qui s'écoule de l'angle nord-ouest de l'Espagne, le long de la côte de Cantabrie, apporte des eaux plus chaudes durant l'hiver (Garcia-Soto *et al.*, 2002). Des tourbillons (« sweddies ») sont générés au-dessus de la pente continentale et transportent des anomalies « d'eaux chaudes » dans les parties plus océaniques (Pingree & Le Cann, 1991 ; Pingree & Le Cann, 1992). Les apports considérables des fleuves français créent des panaches d'eaux plus fraîches qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres sur la côte (Puillat *et al.*, 2004 ; Ménesguen *et al.*, 2018b). Les vents, qui s'inversent de façon saisonnière, induisent des conditions favorables à la remontée d'eaux du fond (« upwelling »), ou inversement à la

descente d'eaux de surface (« downwelling ») dans ces zones particulières de l'étroit plateau espagnol (Fontan *et al.*, 2007). Les flux de chaleur air-mer présentent également une forte variabilité interannuelle dans cette région, en relation avec l'Oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) (Cayan, 1992).

A cette échelle, les données *in situ* sont souvent trop rares pour obtenir des estimations fiables des changements à long terme. Néanmoins, dans le golfe de Gascogne, de nombreuses sources d'observation montrent de fortes variations de température, qu'il s'agisse d'oscillations annuelles et des tendances décennales (Koutsikopoulos *et al.*, 1998 ; Garcia-Soto *et al.*, 2002 ; Michel *et al.*, 2009a ; Michel *et al.*, 2009b ; Lima & Wetthey, 2012 ; Costoya *et al.*, 2015). Cependant, cette variabilité interannuelle n'est pas quantifiée précisément, sa distribution géographique est encore incertaine et ses causes n'ont pas encore été identifiées. La vulnérabilité des écosystèmes du golfe de Gascogne aux impacts d'événements extrêmes et aux changements globaux est accrue par les activités humaines telles que l'exploitation des ressources marines et les rejets industriels et urbains (Chust *et al.*, 2022). De fait, des changements de régimes climatiques ont d'ores et déjà été observés au Sud-Est du golfe avec des impacts potentiels sur les espèces benthiques au large de la côte Basque induits par un réchauffement des eaux (Chust *et al.*, 2022). Ces impacts sur la biomasse phytoplanctonique sont encore peu connus et quantifiés à l'échelle du golfe et il est difficile aujourd'hui d'avoir une image globale des tendances pour ce paramètre sur le long terme.

L'objectif de cette partie est, à l'échelle du golfe de Gascogne, de déterminer et quantifier les tendances de la biomasse phytoplanctonique par son proxy, la concentration en chlorophylle a , et les relier à des phénomènes globaux. Pour y répondre, une série temporelle composée d'images satellite couvrant 21 années [1998-2019] et toute la superficie du golfe a été constituée afin d'approximer les concentrations en chlorophylle a pour chaque pixel. Les débits des fleuves ont été aussi récupérés auprès du Ministère de l'Environnement. Les difficultés rencontrées pour calculer des tendances sont : la présence de données manquantes et exceptionnelles, la non stationnarité des variables à traiter et leur évolution dans le temps. Les modèles linéaires dynamiques (DLM) ont donc été systématiquement utilisés pour extraire les tendances, puis les quantifier, sur la durée des séries disponibles quelles que soient les typologies de données.

2.2 DONNEES ET METHODES

2.2.1 Zone d'étude

Le golfe de Gascogne est situé dans la zone tempérée de l'océan Atlantique nord-est, entre le nord-ouest de la France (au large de la Bretagne) et le nord-ouest de l'Espagne (Galice) (Figure 2). Le golfe est inclus dans la province lusitanienne et dans l'écorégion du plateau atlantique sud-européen (Spalding *et al.*, 2007). Le nom de cette écorégion est également utilisé dans la directive-cadre européenne "Stratégie pour le milieu marin" (DCSMM) et comprend le golfe de Gascogne et les côtes ibériques. Les limites du golfe vont du cap Finisterre, à 43°N, en

Galice, au nord-ouest de l'Espagne, et à 48°N, à Brest (Lavin *et al.*, 2006). Au total, la baie occupe environ 175 000 km². La zone d'étude générale est précisée dans la Figure 2.

Le golfe de Gascogne se décrit comme une unité géomorphologique bien différenciée, orientée vers le nord-ouest. Le bassin abyssal, qui représente environ 50 % de la surface totale, a une profondeur moyenne de 4 800 m. Il est adjacent à la plaine de Porcupine dans la partie nord, mais il est séparé du bassin abyssal ibérique et de la marge ibérique occidentale par les monts sous-marins de Charcot et le banc de Galice (Lavin *et al.*, 2006). Le plateau continental au sud de la baie est quant à lui assez étroit (entre 12 et 30 km), mais il est beaucoup plus large au niveau de la côte française, en particulier au nord, où il peut atteindre plus de 150 km de large. Le talus continental, zone de transition entre le plateau et les grands fonds, est très prononcé, avec une pente de l'ordre de 10 à 12 %, voire plus dans la partie sud-est. Le talus est formé de trois zones principales d'orientations différentes, le versant armoricain nord-ouest/sud-est, le versant aquitain nord-sud, et le versant cantabrique d'orientation est-ouest. Ce versant est traversé par de nombreux canyons, dont les chenaux sont généralement étroits, abrupts, linéaires et sinueux, le plus visible étant le canyon du Cap Breton (Lavin *et al.*, 2006). Les vallées profondes permettent le transport des sédiments continentaux vers les bassins océaniques à partir des principaux fleuves (Vilaine, Loire, Gironde et Adour), tous situés en France, tandis que les rivières du nord de l'Espagne sont plus courtes et ont un faible débit.

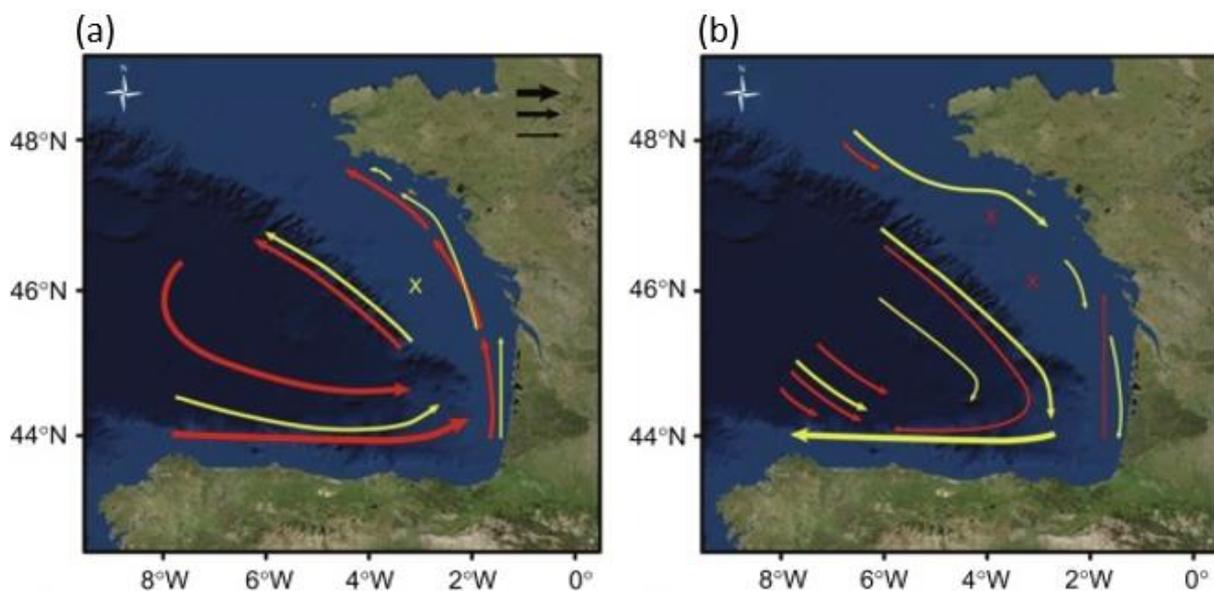


Figure 1 : Schéma de circulation des courants dans le golfe de Gascogne : (a) circulation en automne (rouge) et hiver (jaune) (b) circulation au printemps (rouge) et été (jaune). La largeur des flèches est proportionnelle à l'intensité des courants. Les croix marquent les zones de très faibles courantologies. D'après Charria *et al.* (2013).

La circulation dans le golfe de Gascogne est complexe et dépend de la bathymétrie, des marées, des courants induits par la densité de l'eau et du vent. Ses principales caractéristiques macroscopiques sont résumées dans la Figure 1 créée par Koutsikopoulos & Le Cann (1996) et modifiée par Charria *et al.* (2013). Les vents contrôlent les upwellings dans le golfe de Gascogne (Garcia-Soto & Pingree, 2012) entraînant des courants (Garcia-Soto & Pingree,

Indices environnementaux et tableau de bord de leurs déviations rapport à la climatologie 2000-2020

2012 ; Caballero *et al.*, 2016 ; Kersalé *et al.*, 2016), l'étalement du panache fluvial (Puillat *et al.*, 2004 ; Costoya *et al.*, 2016) et la propagation des vagues (Bertin *et al.*, 2015). La circulation atmosphérique aux latitudes moyennes de l'Atlantique Nord, dans le golfe de Gascogne en particulier, est principalement gouvernée par l'existence d'une zone de haute pression, l'anticyclone des Açores, et d'une zone de basse pression, la dépression d'Islande. Par conséquent, les vents ont tendance à avoir une composante orientale marquée. La position des deux zones de pression varie selon les saisons. Ainsi, l'anticyclone dérive vers le sud-est en hiver et vers le nord-ouest en été. Les roses des vents sont représentées par Alvarez *et al.* (2014) qui ont utilisé des données de bouées à différents endroits du golfe. La bouée Gascogne, située dans la partie centrale de la baie (45,20°N, 5°W), montre la prédominance de vents d'ouest intenses. Des vents du nord-est et du nord sont également observés, mais à des fréquences moindres.

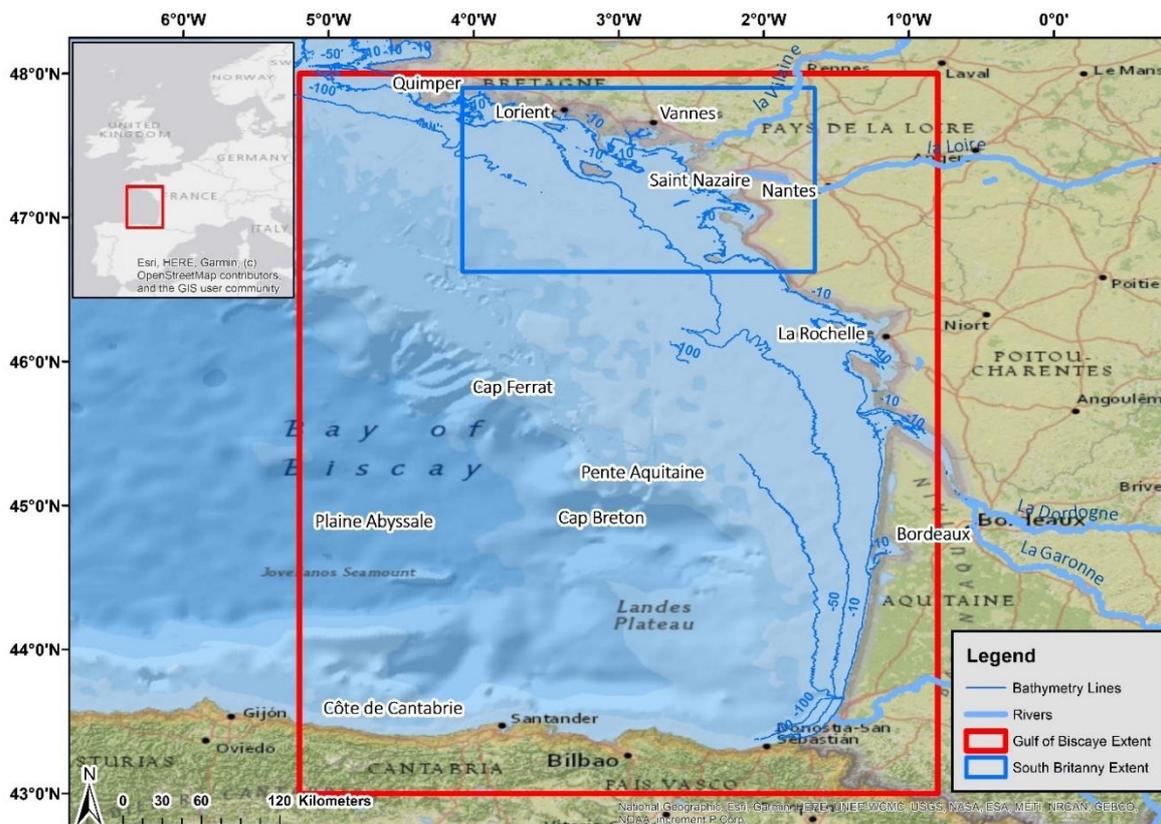


Figure 2 : Zone d'étude à l'échelle du golfe de Gascogne (emprise rouge)

2.2.2 Données de flux et de nutriments

Les débits journaliers de la Loire et de la Vilaine ont été récupérés sur le site du SDeS (<http://hydro.eaufrance.fr/>). Les débits de la Vilaine ne sont extrayables qu'à partir de 2003. La station de mesure à Férel, la plus au sud, a été choisie. Les flux de nutriments ont été récupérés à partir du dernier du RID OSPAR utilisés pour le dernier Quality Status Report (QSR) (OSPAR Commission, 2023c).

2.2.3 Données satellite

Les séries temporelles de chlorophylle *a* de cette étude sont constituées par l'application de l'algorithme OC5 (Gohin *et al.*, 2002 ; Gohin, 2011) sur des images journalières SeaWifs et MODIS pour générer un produit de niveau L3 suivant la nomenclature de la NASA¹.

2.2.4 Méthode

La méthodologie employée est conçue pour répondre à notre problématique de départ à savoir : (i) être capable de traiter d'une façon identique des séries temporelles d'origines diverses mais complémentaires (ii) pouvoir spatialiser et quantifier des tendances à l'échelle régionale (iii) exploiter la complémentarité des données pour expliquer à l'aide de l'une des typologies les tendances calculées à plus large échelle par d'autres. Ces éléments étant posés, le choix des données et des méthodes à appliquer en découle.

La méthodologie se décompose en trois étapes que la Figure 3 synthétise chronologiquement.

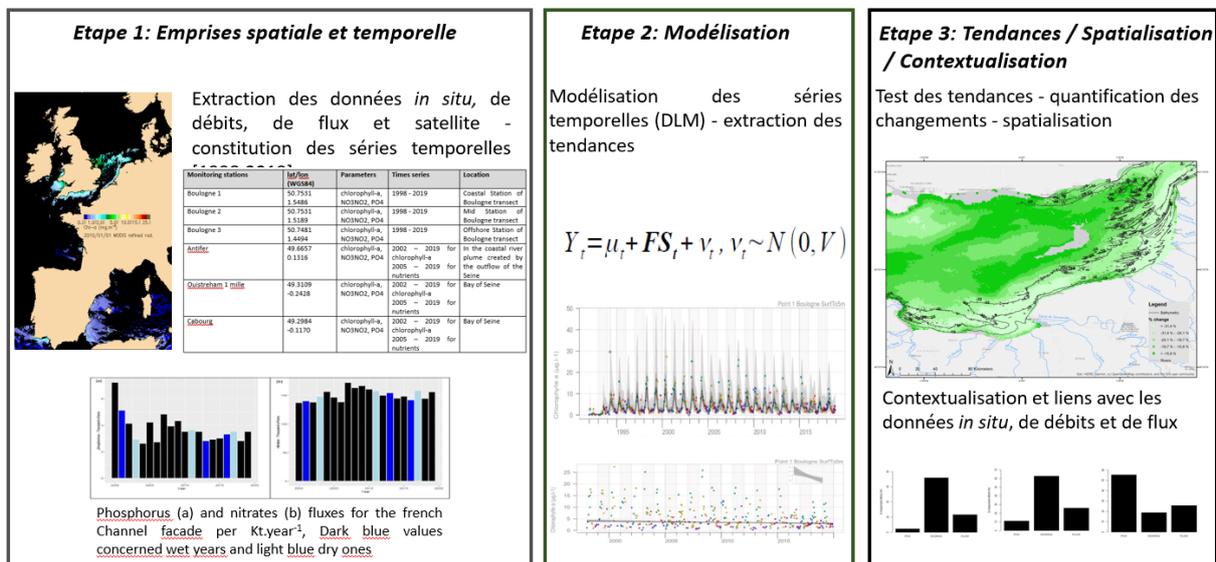


Figure 3 : Etapes de la méthodologie employée pour les différents cas d'utilisation

Emprises spatiale et temporelle

Cette étape permet l'identification des emprises spatiales et temporelles en fonction des objectifs poursuivis et des données disponibles. Les données proviennent du Ministère de l'environnement pour les données de débits des fleuves (<http://hydro.eaufrance.fr/>), d'OSPAR ou du Service des Données et Etudes Statistiques (SDeS – ministère de l'environnement) pour les données de flux et de deux capteurs différents pour les images satellite permettant d'évaluer la chlorophylle : SeaWIFS et MODIS.

La fenêtre temporelle d'analyse est choisie par rapport à l'existence de séries temporelles issues de l'imagerie satellitaire constituées à partir d'images journalières L3 estimant la

¹ <https://www.earthdata.nasa.gov/engage/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels>

Indices environnementaux et tableau de bord de leurs déviations rapport à la climatologie 2000-2020

chlorophylle a et les matières en suspension sur une durée d'au moins 15 ans. La fenêtre temporelle annuelle concernant l'imagerie satellitaire est réduite à la période dite « productive » pour le calcul des moyennes annuelles, c'est-à-dire la période de l'année où la lumière ne devient plus limitante et les apports en nutriments en lien plus direct avec la dynamique du phytoplancton. Elle est définie d'avril à octobre.

Les années dites « sèches » et « humides » ont été définies suivant le critère des débits moyens de la Loire pendant la période productive. Les années « sèches » sont celles pour lesquelles son débit moyen est inférieur à $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (2003, 2011 et 2017) et les années « humides » sont celles pour lesquelles son débit moyen est supérieur à $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (2001, 2008, 2013 et 2016). Quatre années ont été choisies pour être cartographiées, deux par catégorie, en privilégiant une comparaison entre début et fin de période.

L'identification de l'emprise spatiale résulte de l'objectif d'une analyse à une échelle régionale comportant les informations sur les fleuves les plus impactant de la zone. L'imagerie satellitaire journalière est extraite depuis une emprise couvrant tout le golfe. Le pool d'images ainsi constitué est ensuite lu pour constituer pour chacun des pixels géoréférencés une série temporelle comportant les paramètres choisis.

Modélisation

L'agrégation temporelle des séries est effectuée au demi mois. Les DLM (West and Harrison, 1997) sont ensuite utilisés pour décomposer les séries temporelles en tendance et saisonnalité. Le cas échéant, les résultats ont permis d'effectuer un contrôle qualité des séries temporelles.

Tendances / Spatialisation / Contextualisation

Pour chaque série temporelle, un test de tendance linéaire monotone utilisant un test non paramétrique modifié de Mann-Kendall (MK) (Yue & Wang, 2004) est effectué sur les tendances désaisonnalisées issues des DLM. Lorsque les tendances linéaires monotones sont significatives (c'est-à-dire $p < 0,05$), la ligne robuste de Sen (Sen, 1968) est ajustée et les changements calculés à partir des différences entre le début et la fin de cette droite.

Deux types de cartographies sont produites à partir des données satellites. D'une part, des cartographies générales de situation, illustrant les moyennes, ont été réalisées. D'autre part, la constitution des cartes de tendance de la chlorophylle a s'est appuyée sur le traitement présenté ci-avant des séries de tous les pixels des emprises des cas d'étude et de toute la fenêtre temporelle retenue. Afin de quantifier la variabilité interannuelle, les changements entre le début et la fin des lignes robustes de Sen ont été calculés. Ces changements sont cartographiés à la fois en pourcentages et en concentrations ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), avec des classes de couleur basées sur les valeurs des cinq percentiles calculés sur toute la série spatio-temporelle : en dessous du 50^{ème}, entre le 50^{ème} et le 70^{ème} percentile ; entre le 70^{ème} et le 80^{ème} percentile ; entre le 80^{ème} et le 90^{ème} percentile ; et au-dessus du 90^{ème} percentile.

Mise en œuvre technique

Tous les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2021) en s'appuyant pour le test de Man Kendall sur le package 'modifiedmmk'. Toutes les séries temporelles ont été analysées à l'aide du package "dlm" (Petris, 2010). Une parallélisation des traitements a été nécessaire en utilisant le package « parallel » (R-Core, 2015). Le logiciel de cartographie utilisé est ArcGIS dans sa version 10.7.

2.3 RESULTATS

2.3.1 Analyse des débits des fleuves

Le graphe des débits cumulés sur les trois grands fleuves français (Loire, Garonne et Adour (Figure 4)) alimentant l'ensemble du golfe ne donne pas une tendance claire pour leur évolution et indique plutôt une continuité.

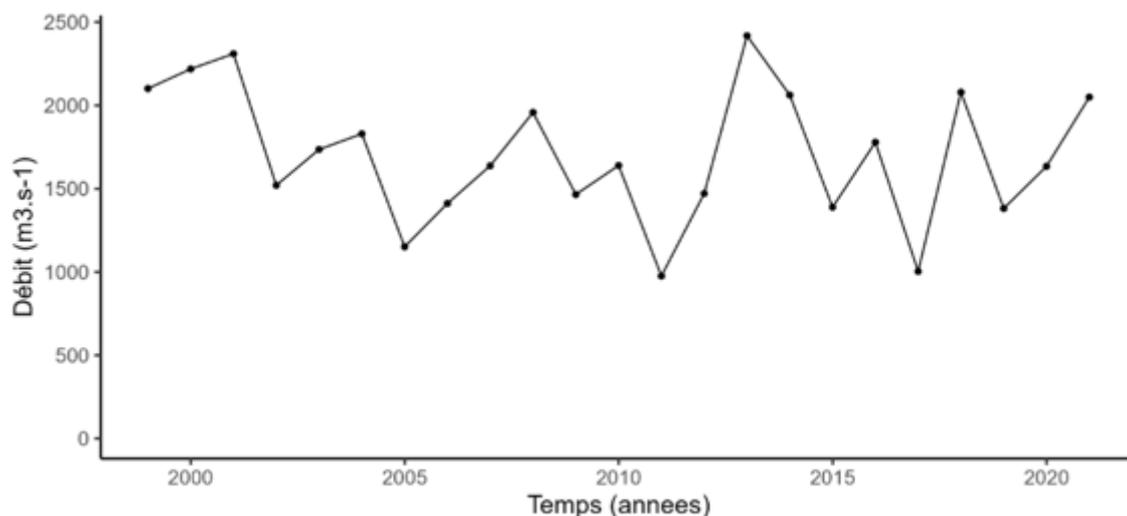


Figure 4 : Moyenne des débits cumulés ($m^3.s^{-1}$) de la Loire, La Gironde et l'Adour sur la période 1998-2021

En utilisant les DLM, des tendances sont estimées à partir des moyennes des séries temporelles des débits de la Loire et de la Vilaine (Figure 6). La Loire montre ponctuellement des débits importants pouvant dépasser $3500 m^3.s^{-1}$ au début de la série temporelle (Figure 5a). Ces valeurs ne sont ensuite plus jamais atteintes, un maximum étant observé en 2013 avec $3200 m^3.s^{-1}$. Depuis 2004, pour les années les plus humides (2008 2013 et 2016), les débits restent inférieurs à $2500 m^3.s^{-1}$ sauf ponctuellement durant l'hiver 2013 (Figure 5a).

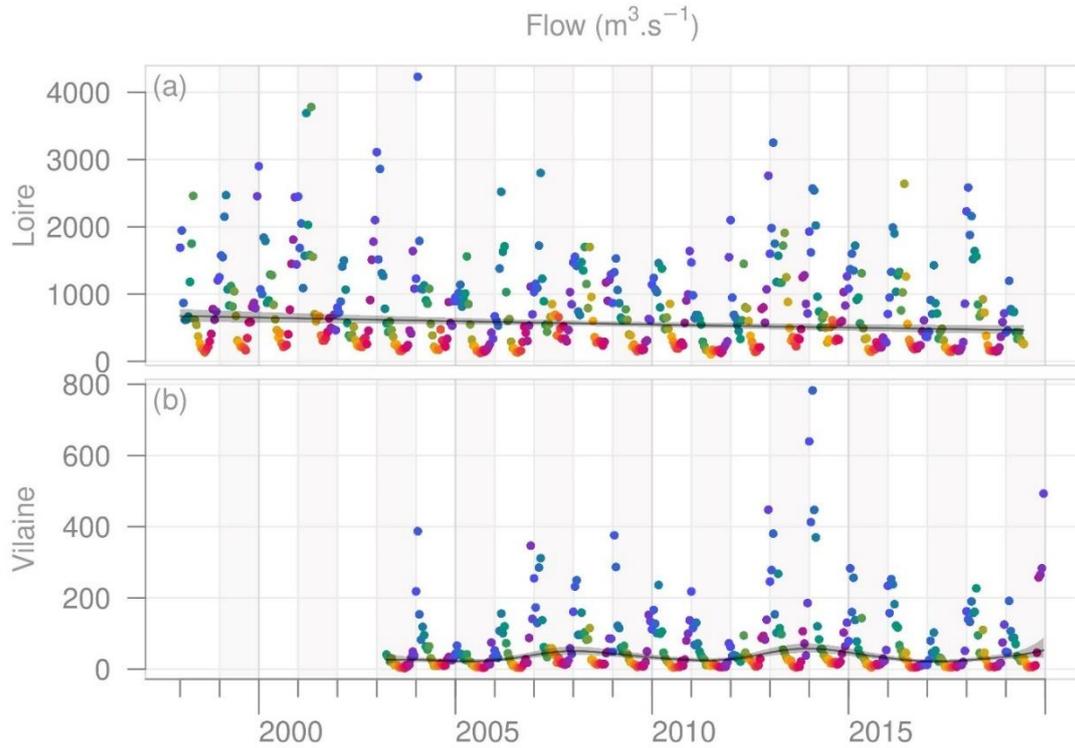


Figure 5 : Tendance désaisonnalisée issue des DLM représentée avec les valeurs moyennes de débits au demi mois pour la Loire (a) et la Vilaine (b). Les zones grises indiquent l'intervalle de confiance à 90%. Chaque point représente une valeur moyenne calculée pour un demi mois, le bleu représentant l'hiver, le vert le printemps, le rouge l'été et le violet l'automne.

La tendance sur les 20 années de la série est continuellement décroissante (Figure 6a). Concernant la Vilaine, les débits restent en dessous de 400 m³.s⁻¹, sauf pour l'année 2014 ou plusieurs débits dépassent cette valeur jusqu'à atteindre 800 m³.s⁻¹ en hiver (Figure 5b). L'examen de la tendance montre un cycle sinusoïdal se répétant sur 5 ans avec une croissance entre 2006 et 2008, puis une décroissance, puis à nouveau une croissance entre 2011 et 2013 (Figure 6b).

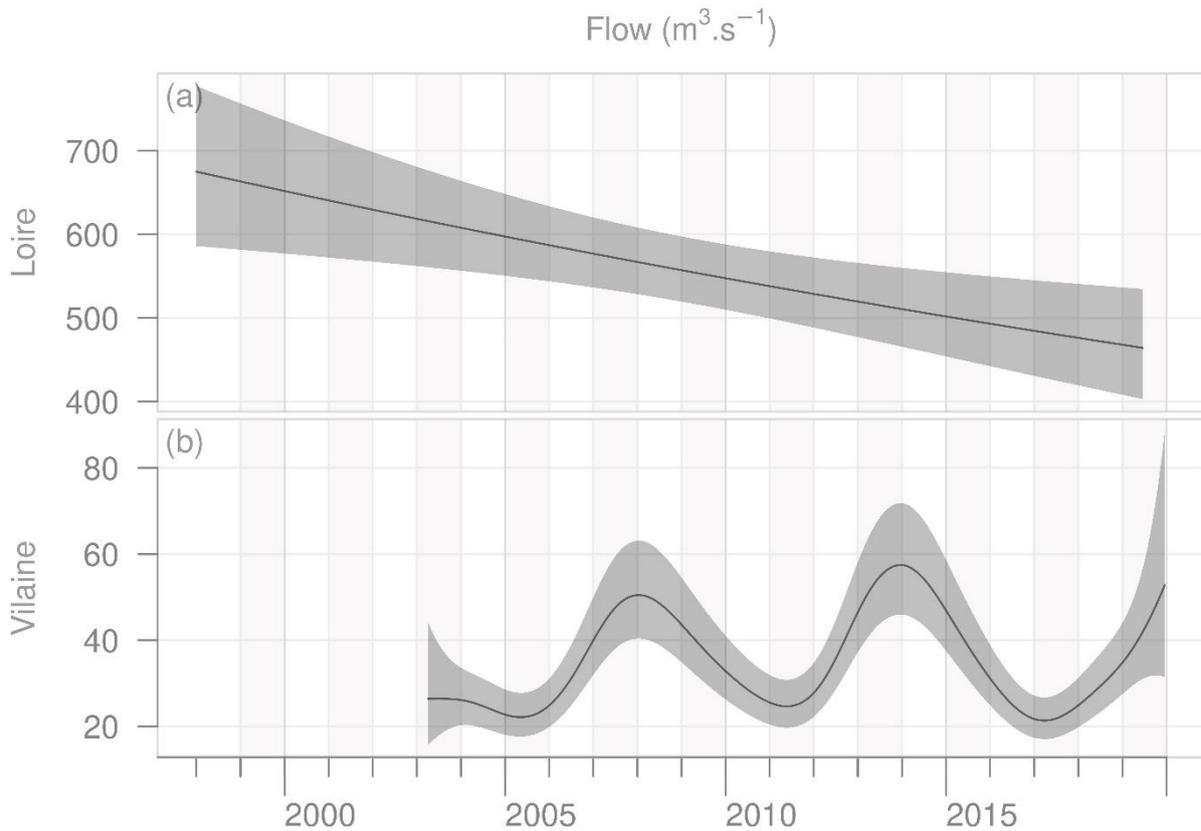


Figure 6 : Séries des tendances issus des DLM pour les débits de la Loire entre 1998 et 2019 (a) et de la Vaine entre 2003 et 2019 (b). Les zones grises indiquent l'intervalle de confiance à 90% du calcul.

2.3.2 Analyse des flux annuels de nutriments

Entre 1998 et 2019, pour le Sud Bretagne, les apports en azote total montrent des variations allant de 200 $Kt \cdot année^{-1}$ à 100 $Kt \cdot année^{-1}$ et n'ont pas décliné par rapport au début de la série temporelle (Figure 7a). Le phosphore total pour la même zone et la même période, a connu une forte baisse : les valeurs du début de l'année 2000, de l'ordre de 6 à 7 $Kt \cdot année^{-1}$, sont tombées à 2.5 $Kt \cdot année^{-1}$ en fin de série (Figure 7b).

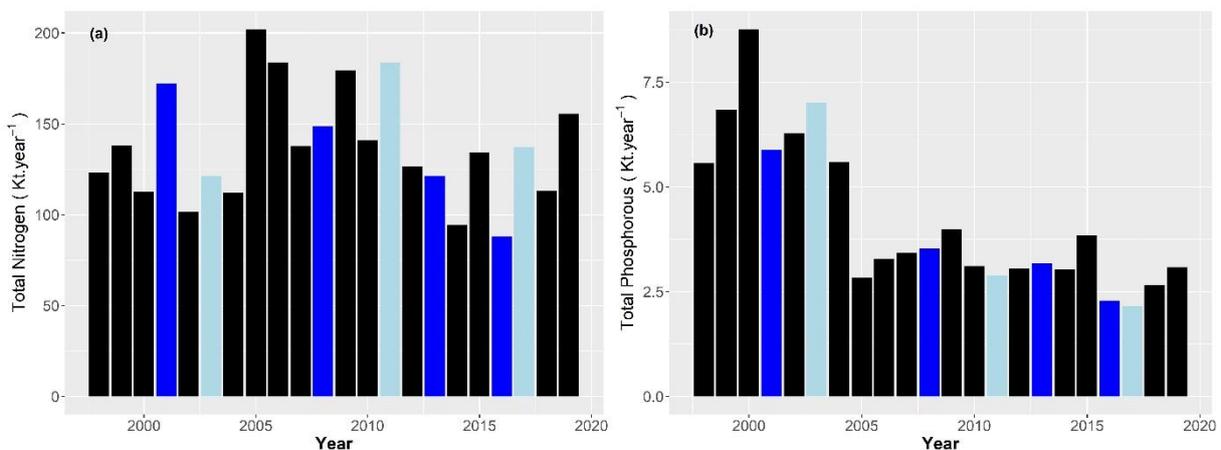


Figure 7 : Flux annuels ($Kt \cdot year^{-1}$) d'azote total (a) et de phosphore total (b) pour le Sud Bretagne et la Loire entre 1998 et 2019. Les valeurs bleu foncé représentent les années dites « humides » et les valeurs bleu clair représentent les années dites « sèches » comme définies préalablement en rapport aux débits annuels de la Loire.

Indices environnementaux et tableau de bord de leurs déviations rapport à la climatologie 2000-2020

Pour le reste du golfe de Gascogne, sur la période [1998,2019], les apports en azote total se maintiennent autour de 150 Kt.année⁻¹ sans variation à la hausse ou à la baisse notable (Figure 8a). Les flux de phosphore total ont connu une décroissance importante en passant de valeurs de l'ordre de 10 Kt.année⁻¹ à 5 Kt.année⁻¹ en fin de période (Figure 8b). Il faut cependant noter l'année 2018 pour laquelle les flux de phosphore total sont remontés à plus de 9 Kt.année⁻¹.

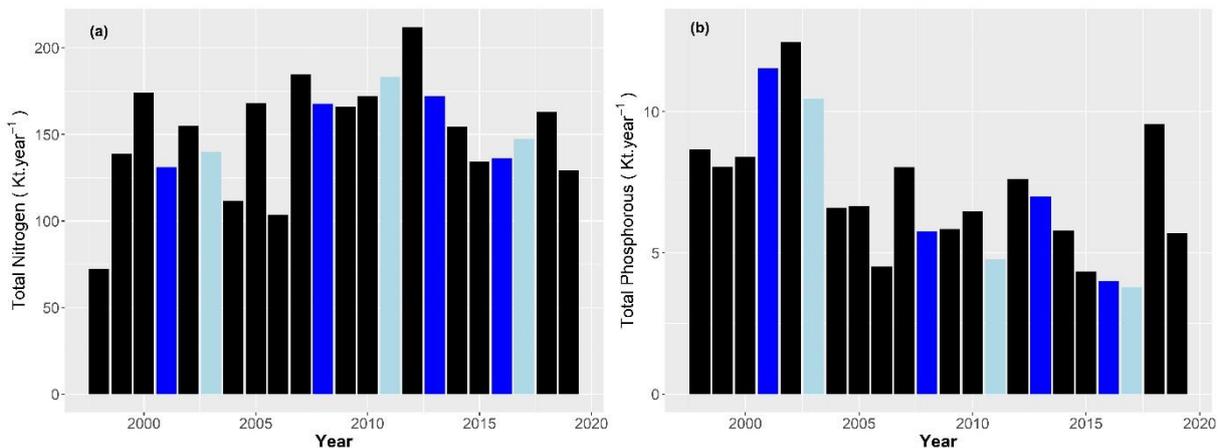


Figure 8 : Flux annuels (kt.year⁻¹) d'azote total (a) et de phosphore total (b) pour le golfe de Gascogne hors Sud Bretagne et Loire entre 1998 et 2019. Les valeurs bleu foncé représentent les années dites « humides » et les valeurs bleu clair représentent les années dites « sèches » comme définies préalablement en rapport aux débits annuels de la Loire.

Le Sud Bretagne, incluant la Loire, reçoit à lui seul la moitié des apports en azote et phosphore du golfe de Gascogne.

2.3.3 Distribution spatiale des changements dans la concentration de chlorophylle *a*

La moyenne des concentrations en chlorophylle *a* sur toute la période [1998,2019] est inférieure à 0.33 µg.l⁻¹ dans la partie abyssale du sud-ouest du golfe. Elle est supérieure à 0.78 µg.l⁻¹ dans les parties plus côtières délimitées grossièrement par la ligne bathymétrique des 50 m et un peu au-delà (Figure 9). On distingue clairement un gradient côte-large est-ouest depuis la côte française lié à la fois à la bathymétrie mais aussi à l'influence des fleuves les plus importants avec des zones de plus fortes concentrations dans le nord-est du golfe. Le sud du golfe, le long de la côte espagnole, montre un gradient nettement moins marqué nord-sud avec des valeurs de chlorophylle *a* chutant rapidement.

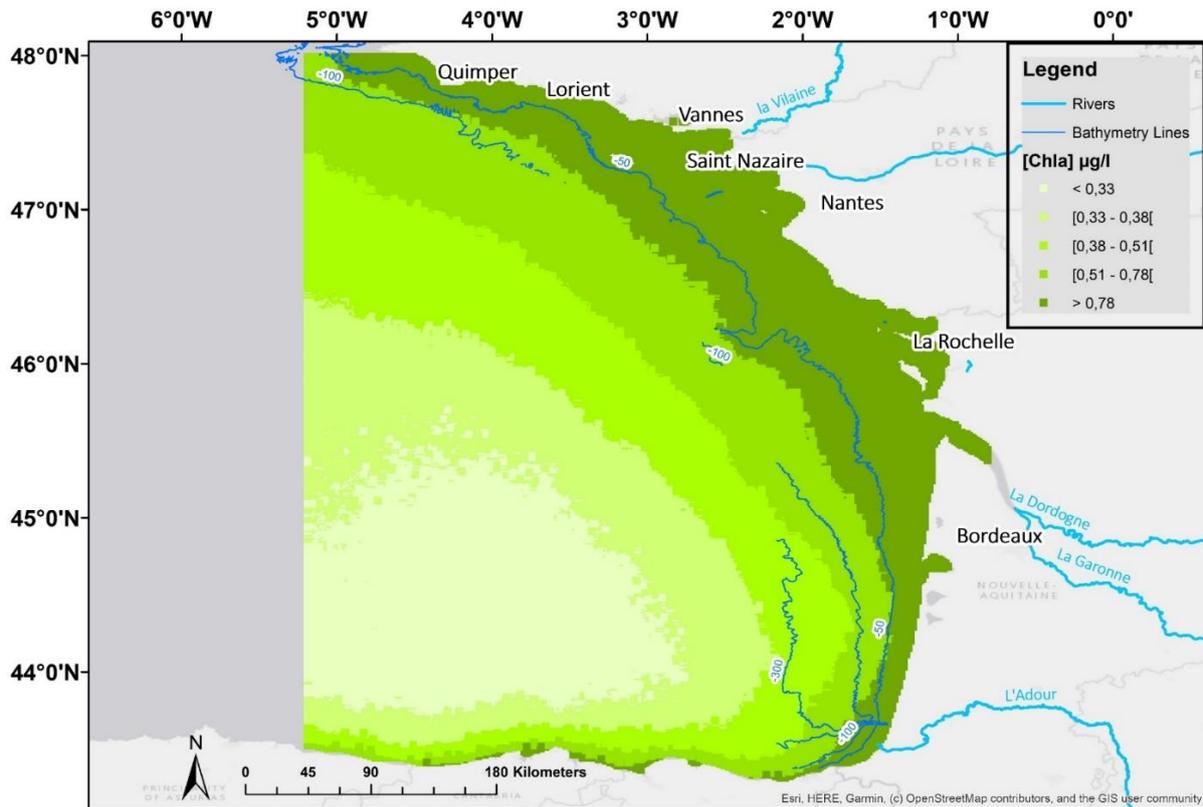


Figure 9 : Distribution spatiale durant la période productive (avril à octobre) de la moyenne de la concentration en chlorophylle *a* ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) entre 1998 et 2019 sur le golfe de Gascogne. Issue du capteur MODIS. Les classes de légende sont calculées sur toute la période et définies comme (i) inférieur au 50^{ème} percentile (ii) entre le 50^{ème} et 70^{ème} percentile (iii) entre le 70^{ème} et le 80^{ème} percentile (iv) entre le 80^{ème} et 90^{ème} percentile (v) supérieur au 90^{ème} percentile

La distribution spatiale de la concentration en chlorophylle *a* pour la période productive pour les années dites « humides » (2001,2016) et « sèches » (2011,2017) est présentée dans la Figure 10. L'année 2011 reste une année exceptionnelle pour les débits de la Loire avec un débit moyen supérieur à $1000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tandis que l'année 2016 constitue l'année la plus récente montrant de forts débits. Pour 2001, les concentrations les plus fortes en chlorophylle *a* atteignent et dépassent la ligne bathymétrique des 100 m tandis que les zones les plus pauvres du centre du golfe sont réduites au minimum. En 2016, on constate une représentation spatiale proche de celle moyennée sur toute la période (Figure 9). Les deux années « sèches » voient les représentations des parties les plus concentrées en chlorophylle *a* nettement réduites aux abords immédiats des côtes et en deçà de la ligne bathymétrique des 50 m. Les zones étendues de fortes concentrations, supérieures à $0.78 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, sont limitées au nord-ouest du golfe, au-delà de l'embouchure de la Gironde (Figure 10). Enfin, si l'on compare l'année 2016 et 2017, les fortes concentrations en chlorophylle *a* sont spatialement quasiment identiques en Sud Bretagne, mais se montrent plus étendues au large de la Garonne jusqu'au bord du plateau.

Pour les 21 années de l'étude, l'examen des tendances de la concentration en chlorophylle *a* révèle une baisse généralisée à l'échelle du golfe pour la période productive (Figure 11). Ces

tendances, extraites des DLM, ont permis d'autre part de quantifier cette diminution (Figure 15). Exprimé en pourcentage, une grande partie de la zone en deçà de la ligne bathymétrique des 50 m est caractérisée par une diminution d'au moins 10% sur la période, ce qui correspond à une valeur d'au moins $0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$. La spatialisation expose cependant plusieurs phénomènes plus locaux. En Sud-Bretagne, de Quimper à Vannes, une particularité émerge avec une tendance à la hausse sur plusieurs kilomètres de large à la côte puis un gradient côte-large marqué (Figure 12). Ce gradient comporte une zone où une tendance continue monotone à la hausse est détectée, puis une zone où la tendance devient non significative et enfin, à environ 15 km des côtes, une nouvelle zone où on revient à une tendance significative continue monotone à la décroissance. L'augmentation de la concentration en chlorophylle a dans la partie très côtière est supérieure à $0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$ pour la période (Figure 16). Une autre particularité concerne la partie centrale située à la limite du plateau au niveau du Cap Ferrat et de la Pente Aquitaine où une augmentation de chlorophylle a est détectée ; les variations y restent cependant faibles car inférieures à $0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$. A une centaine de kilomètres au large de Saint Nazaire au sud-ouest (Figure 12), une zone d'environ 40 par 50 km affiche une diminution de plus de 20 % en chlorophylle a , quantifiée à plus de $0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$ sur la période (Figure 16).

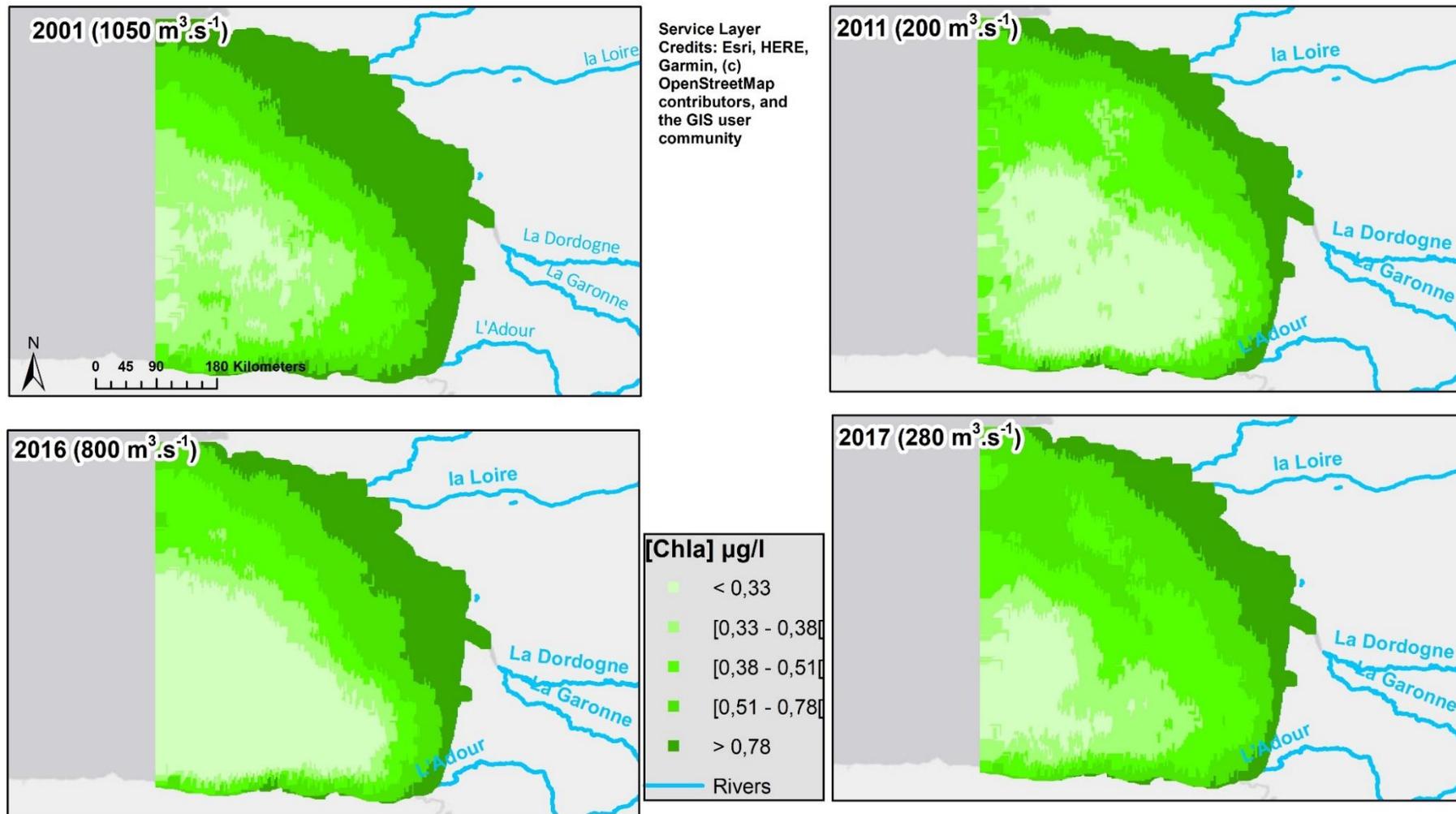


Figure 10 : Distribution spatiale durant la période productive (avril à octobre) de la moyenne de la concentration en chlorophylle a ($\mu\text{g.l}^{-1}$) entre 1998 et 2019 pour les années dites humides (colonne gauche) et les années sèches (colonne de droite). Issue du capteur MODIS. La moyenne des débits de la Loire est indiquée en haut à gauche pour l'année choisie. Les classes de légende sont calculées sur toute la période et définies comme (i) inférieur au 50^{ème} percentile (ii) entre le 50^{ème} et 70^{ème} percentile (iii) entre le 70^{ème} et le 80^{ème} percentile (iv) entre le 80^{ème} et 90^{ème} percentile (v) supérieur au 90^{ème} percentile

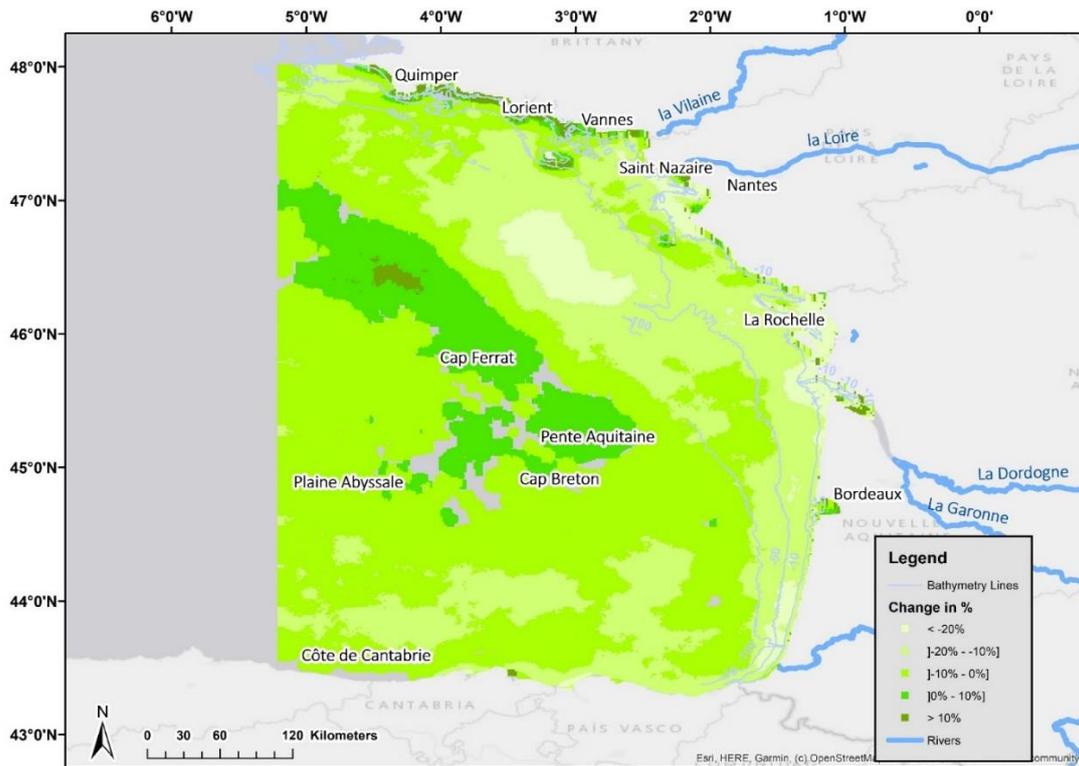


Figure 11 : Intensité du changement dans les concentrations en chlorophylle a au cours des 21 années de l'étude exprimée en pourcentage sur le golfe de Gascogne. Estimation pour chaque pixel issu des séries temporelles de tendances désaisonnalisées traitées par les DLM, capteur MODIS. Les pixels gris sont des pixels pour lesquels aucune tendance monotone significative n'a été détectée

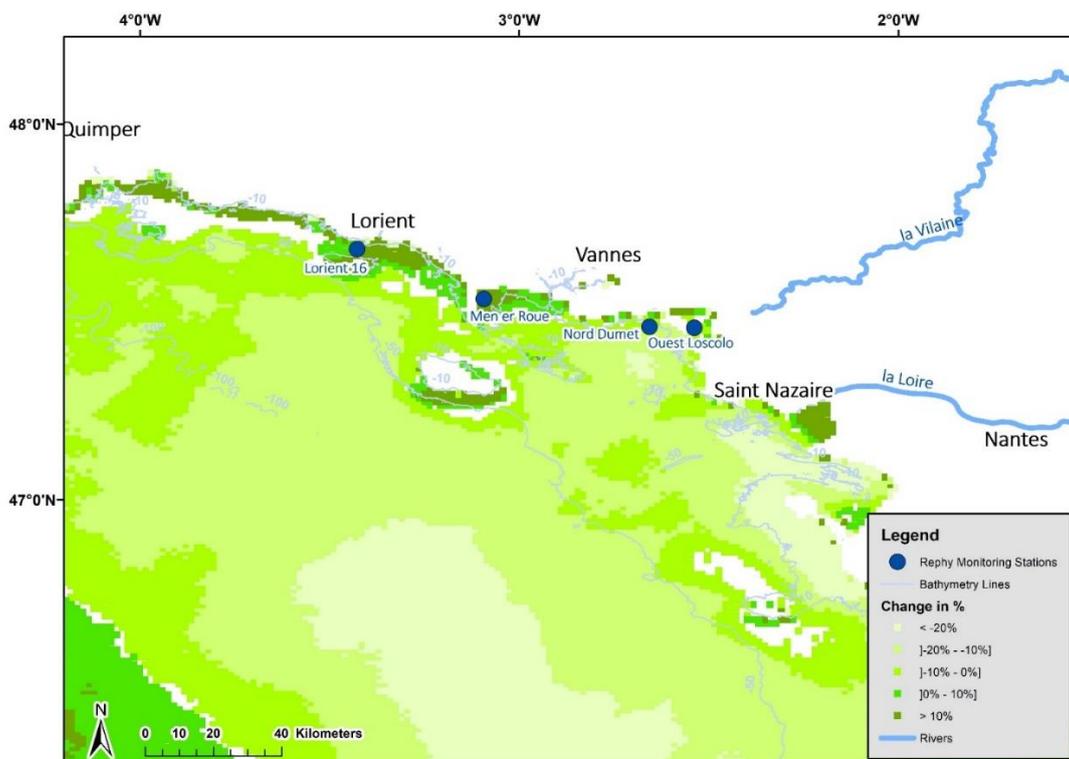


Figure 12 : Intensité du changement dans les concentrations en chlorophylle a au cours des 21 années de l'étude exprimée en pourcentage dans le Sud Bretagne. Estimation pour chaque pixel issu des séries temporelles de tendances désaisonnalisées traitées par les DLM, capteur MODIS. Les pixels blancs sont des pixels pour lesquels aucune tendance monotone significative n'a été détectée

2.4 DISCUSSION

L'étude de la dynamique de la chlorophylle *a* comme proxy de la biomasse phytoplanctonique est un sujet complexe du fait des nombreux paramètres environnementaux intervenant probablement dans cette évolution ; et ceci encore plus en milieu côtier avec des impacts anthropiques plus prégnants qu'il est difficile de quantifier. Dans le golfe de Gascogne, la spatialisation des tendances concernant l'évolution de la chlorophylle *a* met en lumière une baisse généralisée des concentrations de façon significative jusqu'à la limite du plateau continental. Les débits des fleuves, dont les apports ont décru, pourraient être partiellement responsables de cette baisse, mais n'explique pas une spatialisation aussi étendue de ces diminutions, avec un gradient côte-large s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres. Le lien avec le changement global, bien documenté pour la zone, semble central en limitant le développement du phytoplancton par différents phénomènes qui sont discutés ci-dessous.

Déclin de la chlorophylle a à l'échelle du golfe de Gascogne et liens avec le changement global

Les cartes produites dans le cadre de cette étude indiquent une tendance généralisée à la baisse de l'ordre de 10 à 20 % concernant les concentrations en chlorophylle *a* pour le sud et la partie centrale du golfe de Gascogne. Un gradient est perceptible, les plus fortes diminutions ($< -0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$) se situant à la côte, la plaine abyssale restant moins marquée avec des valeurs inférieures à $-0.05 \mu\text{g.l}^{-1}$. La température de surface influence la biomasse phytoplanctonique en impactant les propriétés physiques et chimiques des eaux marines et les espèces qui y vivent avec notamment les relations complexes proies-prédateurs qui s'y tiennent. He *et al.* (2021) sur la période 2002-2019 ont analysé plusieurs zones d'intérêt sur le globe et montré un lien entre température de surface et la concentration de surface en chlorophylle *a*. Leur cartographie indique une association forte entre ces deux paramètres pour la partie au large du golfe de Gascogne et une association moindre pour la partie côtière. L'augmentation de la température favorise la stratification des eaux, menant à des échanges réduits entre les eaux oligotrophes de surface et les eaux plus riches des profondeurs (Sigman *et al.*, 2004 ; Somavilla *et al.*, 2009); la croissance du phytoplancton est alors limitée par les apports en nutriments. Une relation négative a ainsi été démontrée entre la température de surface et la biomasse phytoplanctonique dans l'Atlantique Nord par Van de Poll *et al.* (2013). Lima & Wethey (2012) estiment qu'entre 1982 et 2010 les eaux côtières marines se sont réchauffées en moyenne de $+0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ par décennie et détectent une tendance significative à la hausse pour le golfe de Gascogne. Pour le quart sud-est de cette zone, la température de surface a augmenté de 1.4°C sur la période 1972-1993 (Koutsikopoulos *et al.*, 1998). Gomez-Gesteira *et al.* (2008) confirment une tendance significativement à la hausse de la température de surface pour tout l'arc Atlantique, avec une valeur de $+2.7 \text{ }^\circ\text{C.100a}^{-1}$ calculée entre les années 1985-2005 pour la partie française. Enfin, Chust *et al.* (2022) analysent un réchauffement de la température de surface allant jusqu'à une profondeur de 100 m à un rythme de $0.10\text{-}0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ par décennie sur l'ensemble du golfe. Ils montrent d'autre part que l'épaisseur de la couche mélangée hivernale augmente à un rythme de 21 m par décennie

depuis 1986, ceci étant confirmé par d'autres études (Fontan *et al.*, 2007 ; Valencia *et al.*, 2019).

De leur côté, Costoya *et al.* (2015) ont analysé la variabilité de la température de surface de la mer (SST) pour le golfe de Gascogne sur la période 1982-2014 en utilisant les données journalières de la base de données NOAA 1/4 degré OI. Le réchauffement observé serait principalement dû à l'augmentation de la durée de la saison chaude (entre 6 et 14 jours.déc⁻¹) plus qu'aux hivers plus doux ou aux étés plus chauds. Une différence marquée existe entre le Sud Bretagne, où la durée de la saison chaude atteint jusqu'à 115 jours jusqu'à l'isobathe à 100 m alors qu'elle est plutôt aux alentours des 100 jours dans le reste du golfe. Ce résultat serait responsable de l'augmentation de la fréquence des épisodes de forte chaleur mesurés au printemps (1.16 ± 0.23 jours.déc⁻¹) et en automne (1.81 ± 0.42 jours.déc⁻¹). Les tendances observées pendant le mois le plus chaud (août) sont caractérisées par une augmentation ($\sim 1,0$ jour.déc⁻¹) près du rivage et une diminution ($\sim -1,0$ jour.déc⁻¹) dans la partie océanique du golfe. A la côte, toujours pour le Sud Bretagne, la tendance sur la durée de la saison chaude atteint des valeurs comprises entre 11 et 14 jour.déc⁻¹, ce qui en fait la zone de hausse la plus forte du golfe de Gascogne.

Cet ensemble d'éléments semble démontrer un réchauffement avéré de la température de surface, avec une stratification thermique plus profonde à l'échelle du golfe, qui se prolonge avec des hivers plus doux. Cette dernière n'est pas favorable au développement du phytoplancton (Winder & Schindler, 2004) et les effets attendus du changement climatique dans l'Atlantique nord-est sont une décroissance de la biomasse planctonique (Erauskin-Extramiana *et al.*, 2019 ; Bindoff *et al.*, 2019). Beaulieu *et al.* (2013) et Gregg & Rousseaux (2014) évaluent une tendance significative à la baisse de la chlorophylle *a* sur l'Atlantique Nord comprise entre 0.9% et 1.3% par an. Ce déclin a déjà été observé par Boyce *et al.* (2014) par l'utilisation de données satellite et le QSR 2023 de la commission OSPAR (OSPAR Commission, 2023b), ce qui est en accord avec les résultats présentés. Les cartes des années « sèches » et « humides » visualisent d'autre part une baisse de l'influence des fleuves, ce qui contribue à expliquer le gradient de décroissance des tendances côte-large, avec des apports en nutriments réduits pour les années les plus récentes. Dans son QSR 2023 (OSPAR Commission, 2023a), la commission OSPAR relève d'autre part une augmentation de la population de zooplancton à l'échelle du golfe, ce qui pourrait indiquer une pression plus forte sur le développement du phytoplancton et notamment le raccourcissement de sa période d'efflorescence (Wiltshire & Manly, 2004). Concernant la partie très côtière du Sud Bretagne limitée à des bathymétries faibles, la tendance à la hausse de la chlorophylle *a* peut être en partie liée à la durée accrue de la saison chaude et à l'élévation de la température de l'eau mesurée pour les lieux *in situ* depuis 30 ans (Belin & Soudant, 2018) ; cette zone, en effet, reste sous l'influence directe de la Loire et de la Vilaine avec des apports réguliers en nutriments (Ménèsquen *et al.*, 2018b).

Réflexions sur la méthode et ses limitations

L'utilisation d'une méthodologie identique pour traiter les séries de données *in situ* et satellite via les DLM est un des intérêts de la méthode présentée. En utilisant la seule tendance, on s'affranchit ainsi des variabilités saisonnière et interannuelle (Ratmaya *et al.*, 2019). La spatialisation permet à la fois d'avoir une vue globale des tendances à l'échelle du golfe, mais aussi de détecter des phénomènes plus locaux, comme le phénomène important de baisse de chlorophylle *a* au large de la Loire ou l'augmentation constatée en Sud Bretagne. Une limitation de notre étude est de ne pas adresser les changements au sein de la communauté phytoplanctonique, qui pourraient expliquer pour partie la baisse de chlorophylle *a* avec, par exemple, un changement vers des espèces de plus petite taille (Henson *et al.*, 2021). Même au sein des diatomées, la modification des populations vers des espèces plus petites pourrait être avéré. Ce changement dans les proportions relatives entre espèces de large taille et des espèces plus petites peut contribuer de manière substantielle à l'estimation de la tendance liée au changement climatique (Steinacher *et al.*, 2010). D'autre part, sous l'effet d'une limitation plus sévère en nutriments, les diatomées et autres espèces phytoplanctoniques de grande taille déclinent plus rapidement que les espèces plus petites (Bopp *et al.*, 2005).

A l'échelle du golfe de Gascogne, et notamment pour la partie au-delà du plateau où les concentrations en chlorophylle *a* peuvent devenir très faibles, l'utilisation d'un algorithme dédié (Hu *et al.*, 2012) tel que préconisé par Jackson *et al.* (2016) pourrait permettre d'améliorer les résultats. Dai *et al.* (2023) ont constaté dans l'hémisphère nord, et dans le golfe de Gascogne en particulier, une tendance à l'augmentation des efflorescences. Des patrons à la limite du plateau au nord du golfe (Figure 11) incluant le Cap Ferrat, révélant une tendance à la hausse de la chlorophylle *a*, pourraient y trouver une explication ; ces zones donnent en effet lieu à des efflorescences régulières (Gohin *et al.*, 2003). Elles sont aussi le lieu d'une production primaire importante, comprise entre 700 et 800 mg.C.m⁻².d⁻¹ comme modélisé par Gutknecht *et al.* (2019). Une étude complémentaire prenant en compte le nombre d'efflorescences dans cette zone permettrait d'apporter une contribution à l'explication de ce patron. Elle pourrait s'appuyer notamment sur les données de la base HAEDAT, recensant les épisodes d'efflorescences d'espèces nuisibles à l'échelle mondiale depuis 1985 (Hallegraeff *et al.*, 2021).

L'analyse de la partie Sud Bretagne peut avoir un biais lié à la proximité de la côte et aux techniques liées à la télédétection elle-même, puisque les propriétés optiques et l'environnement marin y sont plus complexes qu'ailleurs avec des effets de voisinage du continent pouvant impacter la qualité des corrections atmosphériques. Gohin *et al.* (2019) ne relèvent cependant pas ces éléments et des précautions ont été prises en termes de masquage et d'éloignement à la côte. Enfin, sur cette zone d'étude du Sud Bretagne, la turbidité due à la proximité de la Loire pourrait avoir un impact sur les algorithmes de traitement d'images estimant la chlorophylle *a*. Les cartographies du mois de mars des matières en suspension non algales de Gohin *et al.* (2019) pour la période 1998-2017 présentent des valeurs pouvant s'élever jusqu'à plus de 20 g.m⁻³ à l'embouchure de la Loire jusqu'à descendre à moins de 10 g.m⁻³ plus au nord le long de la côte. Jusqu'à quelques

kilomètres au large, les valeurs restent cependant supérieures à 5 g.m³ avant de diminuer rapidement. Le panache est ainsi orienté sud-nord avec un gradient côte large de quelques kilomètres. Ces valeurs restent compatibles avec l'utilisation de l'algorithme OC5 (Smith *et al.*, 2018), tout comme les concentrations en chlorophylle *a* qui n'excèdent jamais 25 mg.m⁻³ pour les zones traitées par le satellite.

2.5 CONCLUSION

Les cartographies des tendances de la chlorophylle *a* mettent en avant une baisse significative des concentrations à l'échelle du golfe, avec des patrons visualisant un gradient côte-large mais aussi des particularités plus locales. Au large, l'augmentation de la température constatée de façon générale sur toute la zone impacte négativement la biomasse phytoplanctonique sur le plateau et même au-delà. L'influence du changement climatique semble y jouer un rôle majeur. Au nord du golfe, les zones sous influence de la Loire opposent deux effets, l'un au large de l'embouchure en lien avec les débits plus faibles et la baisse importante de phosphore et l'autre, le long des côtes du Sud Bretagne où la disponibilité en nutriments semble rester à des niveaux élevés permettant une tendance à la hausse des valeurs de chlorophylle *a*.

L'utilisation simultanée de données *in situ* et de données issues de la surveillance satellitaire avec des outils de modélisation communs permet d'avoir une idée plus synthétique de l'évolution des écosystèmes marins côtiers. Pour améliorer encore cette approche, des données plus au large devraient pouvoir être intégrées au processus afin d'être rapprochées des tendances spatialisées des autres typologies de données issues des DLM. Il s'agirait notamment de travailler en parallèle sur les données issues de campagnes à la mer ou du CPR, à l'image des travaux de McQuatters-Gollop *et al.* (2011). La détection des changements la communauté phytoplanctonique à l'aide de ses données devrait aussi être explorée sur le modèle des travaux de Hernández-Fariñas *et al.* (2014) concernant le REPHY. Une approche basée sur la détection par satellite des groupes d'espèces à partir de leurs pigments (Alvain *et al.*, 2008) pourrait aussi être menée, en comparant les évolutions de patrons de ces groupes d'espèces au cours du temps. Les résultats de sorties des modèles, sur la base de ce que fait déjà ECO-MARS3D, seraient d'un apport important notamment pour expliquer la variation des panaches des grands fleuves et la présence de patrons de chlorophylle *a* spécifiques à leur embouchure. Des données satellite plus résolues, utilisant par exemple le capteur OLCI, seraient très utiles pour spatialiser de façon plus complète les tendances notamment en Sud Bretagne à la condition de disposer de séries suffisamment longues. Le lien avec les indices climatiques devrait aussi être exploré plus finement au vu de leur impact sur la dynamique générale du golfe (Goberville *et al.*, 2010). Le NAO a ainsi un impact majeur sur les variations écologiques à travers des effets directs, indirects ou intégrés au niveau des populations en terme de d'abondance, de croissance, de distribution, de phénologie, d'assemblage d'espèces ou encore de survie (Hallett *et al.*, 2004; Drinkwater *et al.*, 2010). Enfin, on ne peut s'empêcher de penser à l'application des directives sur le milieu marin et de la DCSMM (European

Commission, 2008) en particulier. L'application d'une telle méthodologie sur les tendances, quoique ne répondant pas dans ce cas d'étude à l'étendue temporelle voulue, pourrait apporter un élément significatif pour l'évaluation du milieu marin, avec une analyse s'appuyant sur l'ensemble du spectre des données disponibles. Ces données, complémentaires entre elles et traitées de la même façon, permettent d'apporter des explications et de proposer des analyses plus globales sur l'évolution du milieu marin et de la chlorophylle *a* en particulier.

3 Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle *a* et de la température dans le golfe de Gascogne

3.1 INTRODUCTION

En écologie, la compréhension de l'évolution des populations dans l'espace, dans le temps et à différentes échelles d'observation est fondamentale (Frontier *et al.*, 1998). Dans le contexte du changement climatique, les réponses des écosystèmes sont particulièrement difficiles à prédire. Ainsi, un changement brutal peut entraîner des désorganisations dans leur structure même. De nombreux changements de régimes ont été signalés dans de grands écosystèmes marins et semblent souvent être associés au changement climatique (Hare and Mantua, 2000; Deyoung *et al.*, 2004). Les écosystèmes marins sont particulièrement sensibles (Harley *et al.*, 2006) aux impacts directs ou indirects du changement climatique (Jackson *et al.*, 2001; Pandolfi *et al.*, 2003; Harvell *et al.*, 2004). Il est crucial de détecter et quantifier s'il y a eu des changements de régimes liés à des changements globaux, ceux-ci affectant plus ou moins les espèces en fonction de leur sensibilité. Ces changements de régimes peuvent s'interpréter comme des changements de structures spatio-temporelles. La variabilité spatio-temporelle autour des structures spatiales de certaines espèces ou groupes d'espèces marines permet d'appréhender l'impact de ces changements, d'en mesurer les effets voire de pouvoir *in fine* les prédire.

Il est d'autant plus crucial de comprendre l'évolution spatio-temporelle des producteurs primaires et de variables environnementales pour comprendre les potentielles causes de la variabilité spatio-temporelle de la chaîne du réseau trophique supérieur (Woillez *et al.*, 2010). L'océanographie spatiale opérationnelle fournit, depuis plus de 20 ans, des cartes journalières de température et de concentration en chlorophylle *a* de la surface de la mer (<http://marc.ifremer.fr>). En météorologie, des données similaires existent pour les champs de pression atmosphérique, dont l'analyse spatio-temporelle a permis d'identifier des situations caractéristiques et récurrentes (patrons spatiaux) et d'en estimer leurs indices d'activité. L'indice d'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) en est un exemple bien connu (Barnston and Livezey, 1987; Blessing *et al.*, 2005). Ces méthodes de construction des indices météo ont servi

pour analyser les séries temporelles des cartes satellites de chlorophylle a et de température. Une décomposition spatio-temporelle, utilisant les Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) permet d'identifier des patrons spatiaux (vecteurs propres) récurrents et leurs amplitudes temporelles associées (Pearson, 1901). Ces patrons spatiaux remarquables sont interprétés, puis associés à diverses variables explicatives dont les indices météorologiques globaux, les débits des fleuves ou encore la direction des vents afin de participer à la compréhension de l'évolution de la température et de la chlorophylle a .

3.2 PRINCIPAUX RESULTATS

Cette partie reprend de façon très synthétique les travaux de deux stagiaires de master 2 : Marine Dorand et Baptiste Ozanam. Leurs rapports sont disponibles via les liens suivants : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00779/89095/> et <https://w3.ifremer.fr/archimer/doc/00847/95907/103847.pdf>.

SEA SURFACE TEMPERATURE

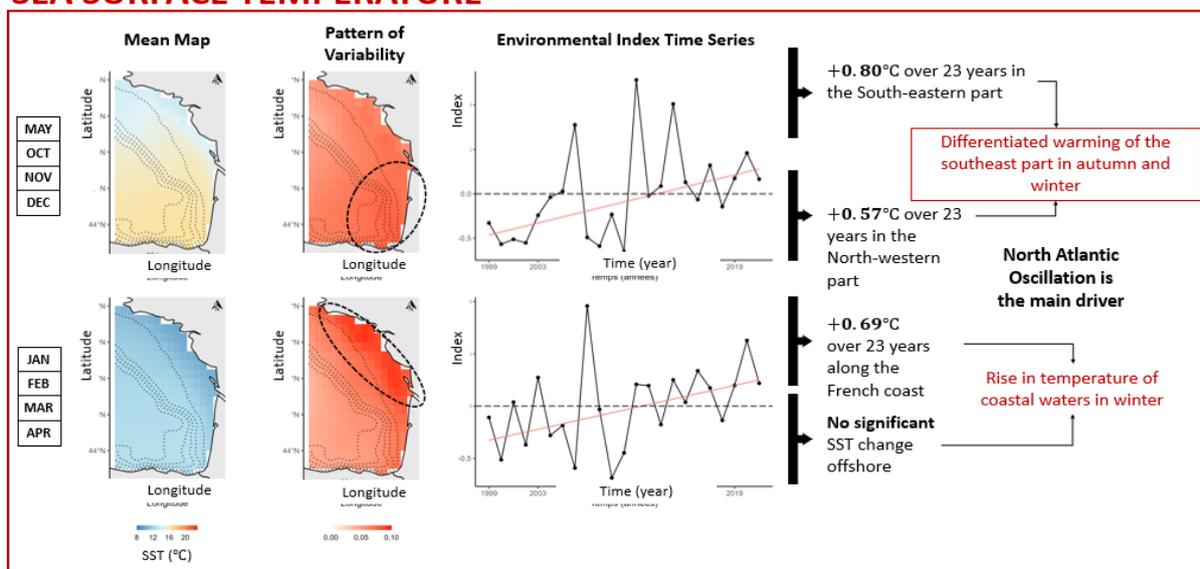


Figure 13 : Patrons spatiaux de température de surface dans le golfe de Gascogne, obtenus par le calcul des EOFs et leur regroupement par la méthode des k-means. Chaque ligne correspond à un patron spatial et son indice. La première colonne montre la carte moyenne des températures pour les mois sélectionnés dans le groupe. La deuxième colonne montre les patrons spatiaux de variabilité. Les isobathes sont représentés tous les 100 mètres de sonde par des lignes pointillées. La troisième colonne montre les cartes de variance locales expliquées. La quatrième colonne montre les séries temporelles des amplitudes. La ligne rouge indique que la pente de la tendance linéaire (Mann-Kendal) est significative.

En hiver, les eaux de surface situées au niveau des côtes françaises se sont réchauffées de façon significative. La hausse cumulée est égale à $+0,69^{\circ}\text{C}$ entre 1999 et 2021.

Durant les mois de transitions (printemps et automne), les eaux de surfaces se réchauffent aussi, mais de façon différenciée. Dans le quart Nord-Ouest du golfe, on quantifie la hausse à $+0,57^{\circ}\text{C}$. Dans le quart Sud-Est, cette hausse est de $+0,80^{\circ}\text{C}$ sur la même période. Aucune tendance linéaire significative n'a en revanche été détectée en été, entre 1999 et 2021.

CHLOROPHYLL-A

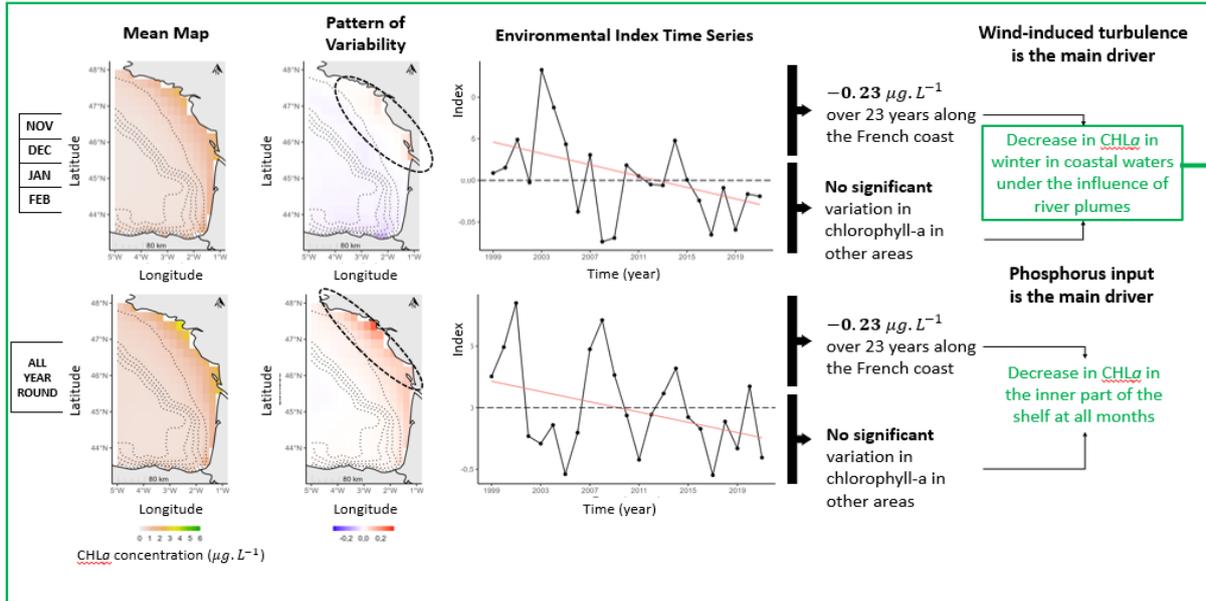


Figure 14 : Patterns spatiaux de concentration en chlorophylle-a dans le golfe de Gascogne, obtenus par la méthode des EOFs et le regroupement des EOFs par k-means. Chaque ligne correspond à un patron spatial et son indice. La première colonne montre la carte moyenne des concentrations pour les mois sélectionnés dans le groupe. La deuxième colonne montre les patrons spatiaux de variabilité. Les isobathes sont représentés tous les 100 mètres de sonde par des lignes pointillées. La troisième colonne montre les cartes de variance locales expliquées. La quatrième colonne montre les séries temporelles des amplitudes. La ligne rouge indique que la pente de la tendance linéaire (Mann-Kendal) est significative.

La concentration en chlorophylle a le long des côtes françaises, notamment au large des fleuves, a baissé de façon significative pour tous les mois de l'année. Entre 1999 et 2021, la biomasse de phytoplancton a ainsi baissé de $0,23 \mu\text{g.l}^{-1}$.

3.3 PRINCIPALES CONCLUSIONS

L'analyse des patrons de variabilité spatio-temporelle des cartes satellites de la température a permis de mettre en évidence un réchauffement significatif des eaux du golfe situées le long de la côte française en hiver et dans le quart Sud-Est durant le printemps et l'automne. Ces réchauffements sont majoritairement influencés par la NAO qui traduit l'effet du réchauffement global du climat sur le golfe de Gascogne. L'analyse des patrons de variabilité spatio-temporelle des cartes satellites de la chlorophylle-a a permis de mettre en évidence une baisse de la biomasse de phytoplancton des eaux côtières à l'échelle de l'année et une baisse devant les estuaires en hiver. Cette dynamique serait principalement influencée par les apports décroissants en phosphore et par le réchauffement des eaux de surface. Dans un contexte de changements globaux et de pressions anthropiques croissantes, l'étude des anomalies de températures et de chlorophylle a à plus petites échelles pourrait améliorer le lien avec des phénomènes de cascades trophiques locaux et intenses.

4 Bibliographie

Cette bibliographie ne concerne que le §2, les rapports évoqués dans le §3 disposants de leur propre bibliographie.

- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Loisel, H., 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles* 22. <https://doi.org/10.1029/2007GB003154>
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., DeCastro, M., Carvalho, D., 2014. Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern Bay of Biscay (2000-2009). *Deep Sea Research* 106, 38–48.
- Beaugrand, G., Edwards, M., Brander, K., Luckaz, C., Ibanez, F., 2008. Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecology Letters* 11, 1157–1168. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01218.x>
- Beaulieu, C., Henson, S.A., Sarmiento, J.L., Dunne, J.P., Doney, S.C., Rykaczewski, R.R., Bopp, L., 2013. Challenging our ability to detect long term trends in ocean chlorophyll. *Biogeosciences* 10, 2711–2724. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2711-2013>
- Belin, C., Soudant, D., 2018. Trente années d'observation des Microalgues et des toxines d'algues sur le littoral, QUAÉ. ed. France.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Bidlot, J.R., 2015. The contribution of short-waves in storm surges: Two case studies in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 96, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.01.005>
- Bindoff, N.L., Kairo, J.G., Aristeguy, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., 2019. IPCC Special Report On The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: chapter 5, Cambridge University Press. New York.
- Bopp, L., Aumont, O., Cadule, P., Alvain, S., Gehlen, M., 2005. Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL023653>
- Boyce, D.G., Dowd, M., Lewis, M.R., Worm, B., 2014. Estimating global chlorophyll changes over the past century. *Prog. Oceanogr.* 122, 163–173.
- Caballero, A., Rubio, A., Ruiz, S., Le Cann, B., Testor, P., Mader, J., 2016. South-Eastern Bay of Biscay eddy-induced anomalies and their effect on chlorophyll distribution. *Journal of Marine Systems* 162, 57–72.
- Cayan, D.R., 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the Northern Oceans : driving the sea surface temperature. *Journal of Physical Oceanography* 22, 859–881.
- Charria, G., Lazure, P., Le Cann, B., Serpette, A., Reverding, G., Louazel, S., 2013. Surface layer circulation derived from Lagrangian drifters in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems* 109.
- Chust, G., Gonzalez, M., Fontan, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Cotano, U., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarminaga, Y., Caballero, A., De Santiago, I., Epelde, I., Liria, P., Ibaibarriaga, L., Garnier, R., Franco, J., Villarino, E., Irigoien, X., Fernandes-Salvador, J.A., Uriarte, Andres, Esteban, X., Orue-Echevarria, D., Figueira, T., Uriarte, Adolfo, 2022. Climate regime shifts and biodiversity redistribution in the Bay of Biscay. *Sci. Total Environ.* 803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149622>
- Conversi, A., Dakos, V., Gardmark, A., Ling, S., Folke, C., Mumby, P.J., Greene, C., Edwards, M., Blenckner, T., Casini, M., Pershing, A.J., Mollmann, C., 2015. A holistic view of marine regime shifts. *Phil. Trans. R. Soc.* 370. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0279>

- Costoya, X., DeCastro, M., Gomez-Gesteira, M., Santos, F., 2015. Changes in sea surface temperature seasonality in the Bay of Biscay over the last decades (1982–2014). *J.Mar.Syst.* 150, 91–101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.06.002>
- Costoya, X., Fernandez-Novoa, D., DeCastro, M., Santos, F., Lazure, P., Gomez-Gesteira, M., 2016. Modulation of sea surface temperature warming in the Bay of Biscay by Loire and Gironde Rivers. *J. Geophys. Res. Oceans* 121, 966–979.
- Dai, Y., Yang, S., Zhao, D., Hu, C., Xu, W., Anderson, D.M., Li, Y., Song, X.P., Boyce, D.G., Zheng, C., Feng, L., 2023. Coastal phytoplankton blooms expand and intensify in the 21st century. *Nature* 615, 281–284. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05760-y>
- Drinkwater, K.F., Beaugrand, G., Kaeriyama, M., Kim, S., Ottersen, G., Perry, R.I., Portner, H.O., Polovina, J.J., Takasuka, A., 2010. On the processes linking climate to ecosystems changes. *J.Mar.Syst.*
- Erauskin-Extramiana, M., Alvarez, P., Arrizabalaga, H., Uriarte, A., Cotano, U., 2019. Historical trends and future distribution of anchovy spawning in the Bay of Biscay. *Deep Sea Research* 159, 169–182.
- European Commission, 2008. Marine Strategy Framework Directive 2008/56/CE.
- Fontan, A., Valencia, V., Borja, A., Goikoetxea, N., 2007. Oceano-meteorological conditions and coupling in the south eastern Bay of Biscay, for the period 2001–2005 : a comparison with the past two decades. *Journal of Marine Systems* 72, 167–177.
- Garcia-Soto, C., Pingree, R.D., 2012. Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and sea surface temperature in the Bay of Biscay and adjacent regions. *J.Mar.Bio.Assoc.UK* 92, 213–234. <https://doi.org/10.1017/S0025315410002134>
- Garcia-Soto, C., Pingree, R.D., Valdes, L., 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay : climate change and swoddy structure from remote sensing and in situ measurements. *J. Geophys. Res. Oceans* 107.
- Goberville, E., Beaugrand, G., Sautour, B., Tréguer, P., 2010. Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 408, 129–148. <https://doi.org/10.3354/meps08564>
- Gohin, F., 2011. Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in situ in coastal waters. *Ocean Sciences* 705–732. <https://doi.org/10.5194/os-7-705-201>
- Gohin, F., Druon, J.N., Lampert, L., 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by Seadas in coastal waters. *International Journal Of Remote Sensing* 1639–1661. <https://doi.org/10.1080/01431160110071879>
- Gohin, F., Lampert, L., Guillaud, J.F., Herbland, A., Nézan, E., 2003. Satellite and in situ observations of a late winter phytoplankton bloom, in the northern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 23, 1117–1141. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(03\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(03)00088-8)
- Gohin, F., Van der Zande, D., Tilstone, G., Marieke, A., Lefebvre, A., 2019. Twenty years of satellite and in situ observations of surface chlorophyll-a from the northern Bay of Biscay to the eastern English Channel. Is the water quality improving ? *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111343>
- Gomez-Gesteira, M., DeCastro, M., Alvarez, I., Gomez-Gesteira, J.L., 2008. Coastal sea surface temperature warming trend along the continental part of the Atlantic Arc (1985–2005). *J. Geophys. Res. Oceans* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JC004315>
- Gregg, W.W., Rousseaux, C.S., 2014. Decadal trends in global pelagic ocean chlorophyll: A new assessment integrating multiple satellites, in situ data, and models. *J. Geophys. Res.*

- Oceans 119, 5921–5933. <https://doi.org/10.1002/2014JC010158>
- Gutknecht, E., Reffray, G., Mignot, A., Dabrowski, T., Sotillo, M.G., 2019. Modelling the marine ecosystem of Iberia–Biscay–Ireland (IBI) European waters for CMEMS operational applications. *Ocean Sciences* 15, 1489–1516. <https://doi.org/10.5194/os-15-1489-2019>
- Hallegraeff, G.M., Anderson, D.M., Belin, C., Bottein, M.Y.D., Bresnan, E., Chinain, M., Zingone, A., 2021. Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts. *Comm. Earth Environ.* 2, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00178-8>
- Hallett, T.B., Coulson, T., Pilkington, J.G., Clutton-Brock, T.H., Pemberton, J.M., Grenfell, B.T., 2004. Why large scale climate indices seems to predict ecological processes better than local weather. *Nature*.
- He, J., Cazelles, B., Wu, J., Leng, J., Christakos, G., 2021. Spatiotemporal variation of the association between sea surface temperature and chlorophyll in global ocean during 2002–2019 based on a novel WCA-BME approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 105. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102620>
- Henson, S.A., Cael, B.B., Allen, S.R., Dutkiewicz, S., 2021. Future phytoplankton diversity in a changing climate. *Nature Communications* 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25699-w>
- Hernández-Fariñas, T., Soudant, D., Barillé, L., Belin, C., Lefebvre, A., Bacher, C., 2014. Temporal changes in the phytoplankton community along the French coast of the eastern English Channel and the southern Bight of the North Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 71, 821–833. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst192>
- Hu, C., Lee, Z., Franz, B., 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *J. Geophys. Res. Oceans* 117.
- Jackson, T., Brewin, R.J.W., Sathyendranath, S., 2016. A round robin comparison of bio-optical algorithms applied to remotely-sensed reflectance data alongside fuzzy classification.
- Kersalé, M., Marié, L., Le Cann, B., Serpette, A., Lathuilière, C., Le Boyer, A., 2016. Poleward along-shore current pulses on the inner shelf of the Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 179, 155–171.
- Koutsikopoulos, C., Beillois, P., Leroy, C., Taillefer, F., 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. *Oceanol. Acta* 21, 335–344.
- Koutsikopoulos, C., Le Cann, B., 1996. Physical processes and hydrological structures related to the Bay of Biscay Anchovy. *Scientia Marina* 60, 9–19.
- Lavin, A., Valdes, L., Sanchez, F., Abaunza, P., Forest, A., Boucher, J., 2006. The Bay of Biscay: The encountering of the Ocean and the shelf, in: *The Sea*. pp. 993–1001.
- Levitus, S., Antonov, J., Boyer, T., 2005. Warming of the world ocean, 1955—2003. *Geophysical Research Letters* 32. <https://doi.org/10.1029/2004GL021592>
- Lima, F.P., Wetthey, D.S., 2012. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nature Communications* 3. <https://doi.org/10.1038/ncomms1713>
- McQuatters-Gollop, A., Reid, P.C., Edwards, M., Burkill, P.H., Castellani, C., Batten, S., Gieskes, W., Beare, D.J., Bidigare, R.R., Head, E., Johnson, R., Kahru, M., Koslow, J.A., Pena, A., 2011. Is there a decline in marine phytoplankton? *Nature* 472. <https://doi.org/10.1038/nature09950>

- Ménesguen, A., Dussauze, M., Dumas, F., 2018b. Designing optimal scenarios of nutrient loading reduction in a WFD/MSFD perspective by using passive tracers in a biogeochemical-3D model of the English Channel/Bay of Biscay area. *Ocean and Coastal Management* 163, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.06.005>
- Michel, S., Treguier, A.M., Vandermeirsch, F., 2009a. Temperature variability in the Bay of Biscay during the past 40 years, from an in situ analysis and a 3D global simulation. *Continental Shelf Research* 29, 1070–1087.
- Michel, S., Vandermeirsch, F., Lorance, P., 2009b. Evolution of upper layer temperature in the Bay of Biscay during the last 40 years. *Aquatic Living Resources* 22, 447–461. <https://dx.doi.org/10.1051/alr/29009054>
- OSPAR Commission, 2023a. Changes in Phytoplankton Biomass and Zooplankton Abundance (Quality Status Report).
- OSPAR Commission, 2023b. Concentrations of Chlorophyll-a in the Greater North Sea, Celtic Seas and Bay of Biscay and Iberian Coast (Quality Status Report).
- OSPAR Commission, 2023c. Riverine Inputs and Direct Discharges to Convention Waters OSPAR Contracting Parties. RID 2023 Data Report.
- Pershing, A.J., Mills, K.E., Record, N.R., Stamieszkin, K., Wurtzell, K.V., Byron, C.J., Fitzpatrick, D., Golet, W.J., Koob, E., 2015. Evaluating trophic cascades as drivers of regime shifts in different ocean ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc.* 370. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0265>
- Petris, G., 2010. An R package for dynamic linear models. *J. Stat. Softw* 1–16. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i12>
- Pingree, R.D., Le Cann, B., 1992. Anticyclonic eddyX91 in the southern Bay of Biscay region, May1991 to February 1992 97, 14353–14367.
- Pingree, R.D., Le Cann, B., 1991. Three anticyclonic slope water oceanic eDDIES (SWODDIES) in the Southern Bay of Biscay in 1990. *Deep Sea Research* 39, 1147–1175.
- Puillat, I., Lazure, P., Jégou, A.M., Lampert, L., Miller, P.I., 2004. Hydrographical variability on the French continental shelf in the Bay of Biscay, during the 1990s. *Continental Shelf Research* 24, 1143–1163. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.02.008>
- R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Ratmaya, W., Soudant, D., Salmon-Monviola, J., Cochenec-Laureau, N., Goubert, E., Andrieux-Loyer, F., Barillé, L., Souchu, P., 2019. Reduced phosphorus loads from the Loire and Vilaine rivers were accompanied by increasing eutrophication in the Vilaine Bay (South Brittany, France). *Biogeosciences* 1361–1380. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1361-2019>
- R-Core, 2015. Package “parallel.”
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., Walker, B., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413, 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall’s Tau. *Journal of the American Statistical Association* 1379–1389. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Sigman, D.M., Jaccard, S.L., Haug, G.H., 2004. Polar ocean stratification in a cold climate. *Nature* 428, 59–63. <https://doi.org/10.1038/nature02357>
- Smith, M.E., Robertson-Lain, L., Bernard, S., 2018. An optimized Chlorophyll a switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters. *Remote Sensing of Environment* 215, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.002>
- Somavilla, R., Gonzalez-Pola, C., Rodriguez, C., Josey, S.A., Sanchez, R.F., Lavin, A., 2009. Large

- changes in the hydrographic structure of the Bay of Biscay after the extreme mixing of winter 2005. *J. Geophys. Res. Oceans* 114. <https://doi.org/10.1029/2008JC004974>
- Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, M., Ferdana, Z.A., Finlayson, M., 2007. Marine ecoregions of the World: A bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience* 57, 573–583.
- Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T.L., Bopp, L., Cadule, P., Cocco, V., Doney, S.C., Gehlen, M., Lindsay, K., Moore, J.K., Schneider, B., Segschneider, J., 2010. Projected 21st century decrease in marine productivity: A multi-model analysis. *Biogeosciences* 7, 979–1005. <https://doi.org/10.5194/bg-7-979-2010>
- Valencia, V., Fontan, A., Goikoetxea, N., Chifflet, M., Gonzalez, M., Lopez, A., 2019. Long term evolution of the stratification, winter mixing and signature of upper water masses in the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 181, 124–134.
- Van de Poll, W.H., Kulk, G., Timmermans, K.R., Brussaard, C.P.D., Van der Woerd, H.J., Kehoe, M.J., Mojica, K.D.A., Visser, R.J.W., Rozema, P.D., Buma, A.G.J., 2013. Phytoplankton chlorophyll a biomass, composition, and productivity along a temperature and stratification gradient in the northeast Atlantic Ocean. *Biogeosciences* 10, 4227–4240. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4227-2013>
- West, M., Harrison, J., 1997. *Bayesian Forecasting and Dynamic Models*, 2nd Edn. ed, Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York.
- Wiltshire, K.H., Manly, B.F.J., 2004. The warming trend at Helgoland Roads, North Sea: phytoplankton response. *Helgol Mar Res* 58, 269–273. <https://doi.org/10.1007/s10152-004-0196-0>
- Winder, M., Schindler, D., 2004. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85, 2100–2106. <https://doi.org/10.1890/04-0151>
- Wuillez, M., Petitgas, P., Huret, M., Struski, C., Léger, F., 2010. Statistical monitoring of spatial patterns of environmental indices for integrated ecosystem assessment: Application to the Bay of Biscay pelagic zone. *Prog. Oceanogr.* 87, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.009>
- Yue, Y., Wang, C., 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour. Manag.* 201–218. <https://doi.org/10.1023/B:Warm.0000043140.61082.60>, 2004

5 Annexes

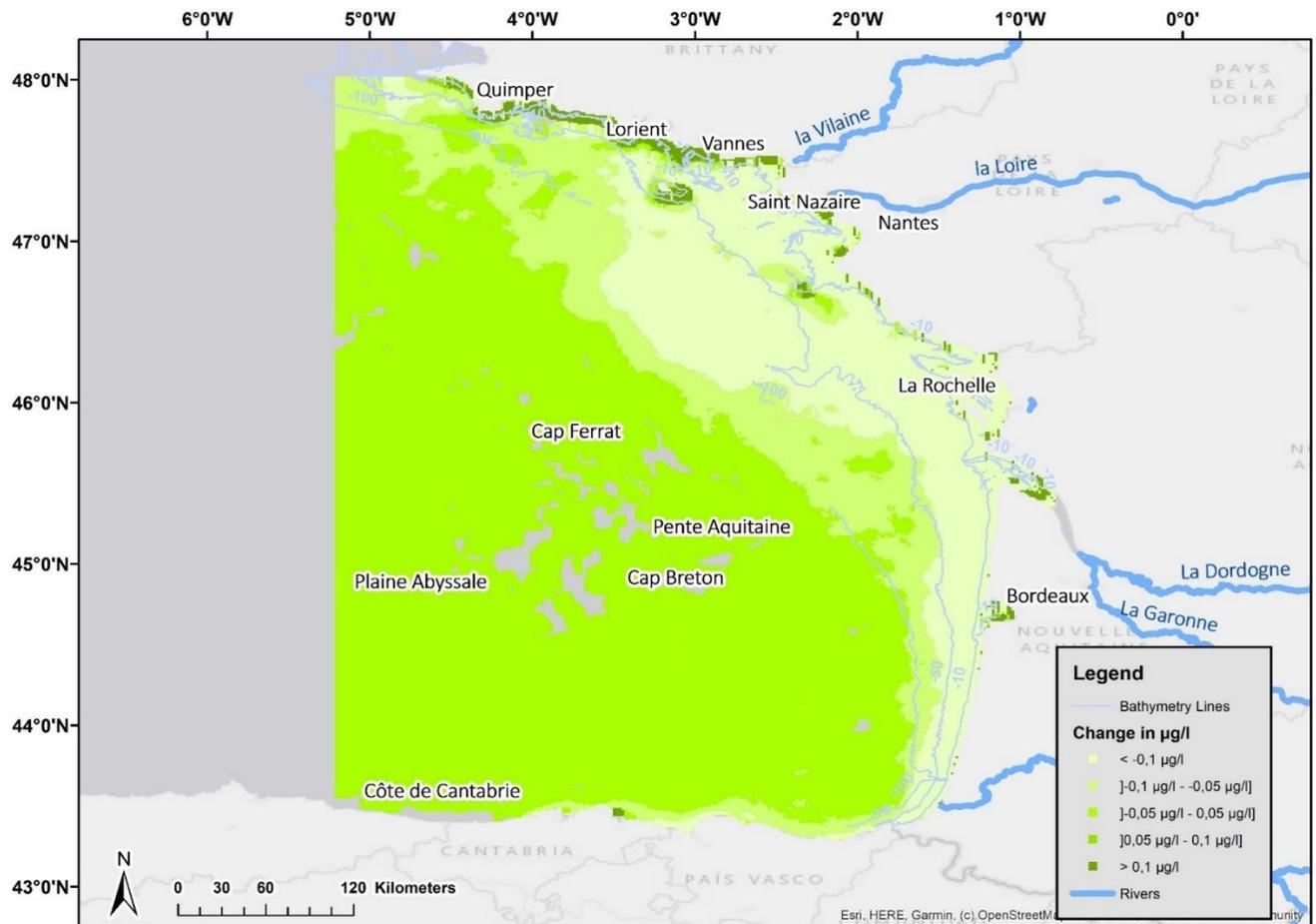


Figure 15 : Intensité du changement dans les concentrations en chlorophylle a au cours des 21 années de l'étude exprimée en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ dans le Sud Bretagne. Estimation pour chaque pixel issu des séries temporelles de tendances désaisonnalisées traitées par les DLM. Les pixels gris sont des pixels pour lesquels aucune tendance monotone significative n'a été détectée

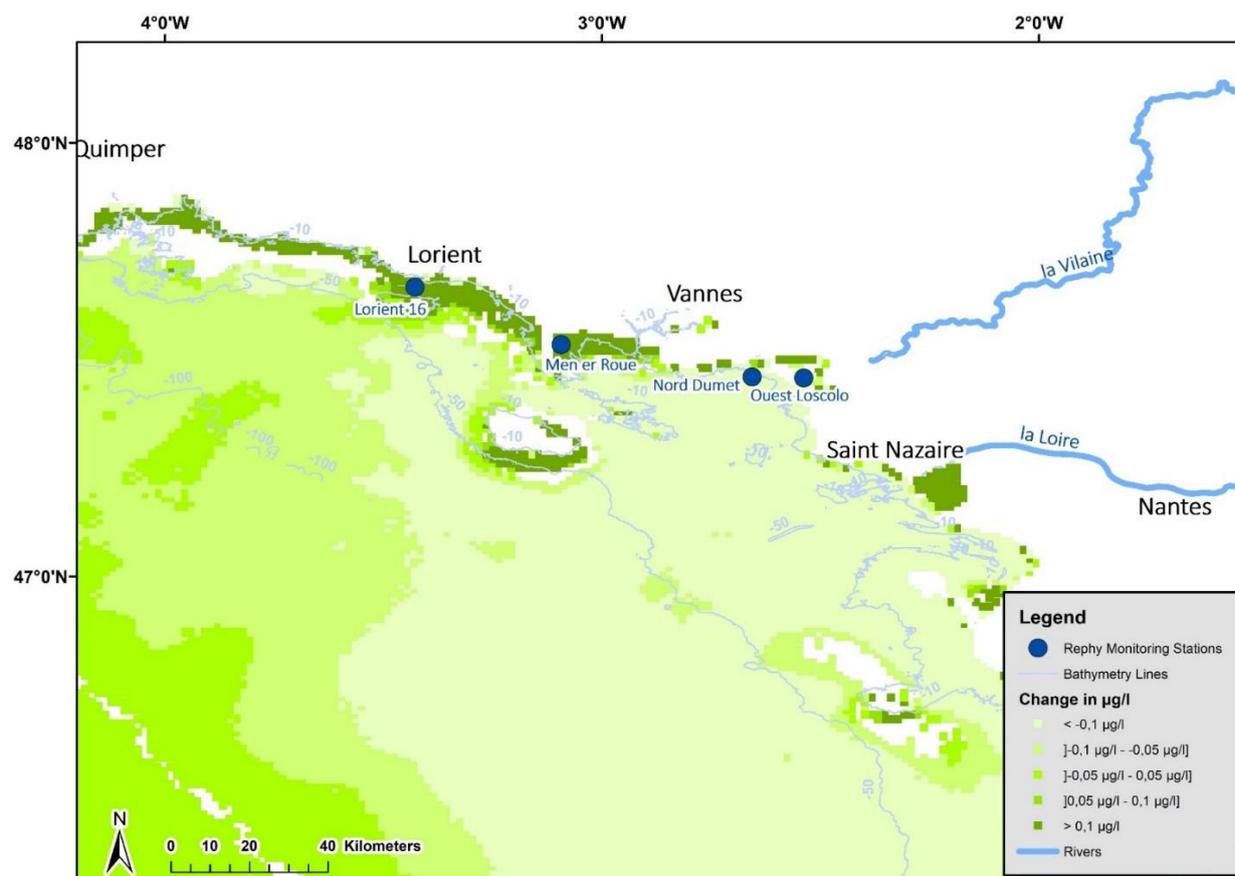


Figure 16 : Intensité du changement dans les concentrations en chlorophylle a au cours des 21 années de l'étude exprimée en $\mu\text{g.l}^{-1}$ dans le Sud Bretagne. Estimation pour chaque pixel issu des séries temporelles de tendances désaisonnalisées traitées par les DLM. Les pixels blancs sont des pixels pour lesquels aucune tendance monotone significative n'a été détectée.