

UNIVERSITE SORBONNE UNIVERSITE
Paris, France

Thèse de Master

Année 2022-2023

Master Sciences de la Mer

Indices environnementaux et corrélations avec les niveaux trophiques supérieurs dans le golfe de Gascogne

Baptiste OZANAM

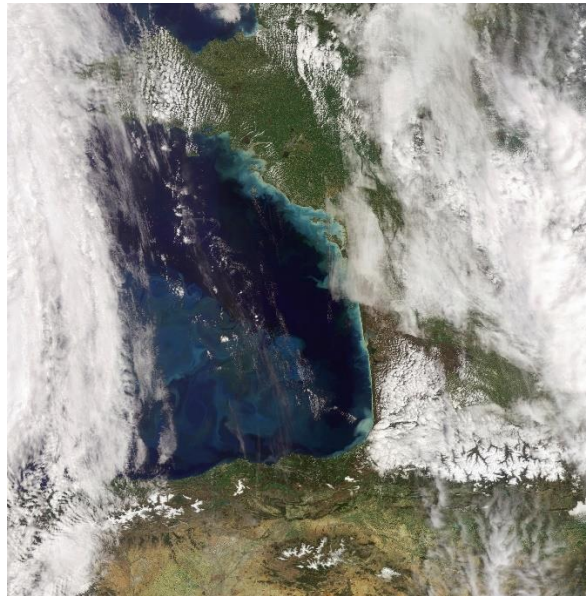


Image satellite d'un bloom phytoplanktonique dans le golfe de Gascogne © ESA

Réalisé sous la responsabilité d'Antoine Huguet et de Pierre Petitgas

Service Valorisation de l'Information pour la Gestion Intégrée et la Surveillance
(VIGIES), Centre Atlantique de Nantes, Institut Français de Recherche pour
l'Exploitation de la Mer (IFREMER)

A qui de droit,

L'administration du Master Sciences de la Mer de l'Université Sorbonne Université, est l'unique dépositaire des manuscrits servant à valider les Thèses de Master. Nous ne diffusons des copies que sur demande écrite, après avoir sollicité l'accord de l'auteur et du ou des responsables du stage qui a conduit à l'écriture de la Thèse. En apposant la mention ci-dessous dans la première page du manuscrit (page de couverture intérieure), nous nous engageons à ne pas diffuser le manuscrit et à transmettre toute demande à l'auteur et au responsable de stage qui la traitera indépendamment.

Alain NIERGA

Gestionnaire de la formation

SORBONNE UNIVERSITÉ
FACULTE SCIENCES et INGENIERIE
MASTER SCIENCES DE LA MER
Tour 46 - 46/00 - Etage BC 6
4 place JUSSIEU
75252 PARIS Cedex 05

Avertissement/Disclaimer

Cette Thèse de Master a été réalisée de manière indépendante, pour remplir une partie des conditions d'obtention du titre de Master Sciences de la Mer de l'Université Sorbonne Université. Aucune autre assistance ou source que celles mentionnées n'ont été utilisées. Aucune donnée ne pourra être prise de ce manuscrit sans l'approbation de l'auteur et du responsable de stage.

This Master Thesis has been independently composed for the partial fulfillment of the title of Master of Science in Marine Sciences at University «Sorbonne Université ». No other than the indicated aid and sources have been used. It has not been presented to any other examination board. No data can be taken out of this manuscript without prior approval of the author and the thesis-promoter.

Sommaire

Remerciements	i
Liste des figures et des tableaux	ii
Liste des symboles et des abréviations	iii
1. Introduction.....	1
2. Matériels et Méthodes.....	3
2.1 Zone d'étude et cartes satellites	3
2.2 Méthode des Fonctions Orthogonales Empiriques.....	4
2.3 Variables environnementales et niveaux trophiques supérieurs.....	7
2.4 Corrélations avec les amplitudes d'EOFs.....	8
3. Résultats	9
3.1 Température de surface	9
3.1.1 Évolution saisonnière	9
3.1.2 Patrons moyens de variabilité	10
3.1.3 Spatialisation des variations de température	12
3.2 Concentration en chlorophylle-a.....	13
3.2.1 Évolution saisonnière	13
3.2.2 Patrons moyens de variabilité	14
3.2.3 Spatialisation des variations de chlorophylle-a.....	16
3.3 Variables environnementales.....	17
3.3.1 Évolutions annuelles et saisonnières	17
3.3.2 Partition de variance	19
3.4 Effets des indices satellitaires sur les niveaux trophiques supérieurs	20
3.4.1 Petits poissons pélagiques.....	20
3.4.2 Mammifères marins	22
4. Discussion	22
4.1 Évolution de la température de surface.....	23
4.2 Évolution de la concentration en chlorophylle-a	25
4.3 Liens entre les niveaux trophiques.....	26
4.4 Limites	28
5. Conclusion et perspectives.....	29
Bibliographie.....	30
Annexes	34
Résumé.....	36
Abstract	36

Remerciements

Je tiens à remercier mes maîtres de stage, Pierre Petitgas et Antoine Huguet, pour leur confiance et leurs conseils avisés dans la réalisation de ce projet. Ils ont su m'aiguiller dans ma réflexion et m'ont pleinement soutenu dans la construction de mon parcours professionnel. Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe VIGIES pour leur accueil et leurs pauses café qui ont toujours su égayer mes journées. Je remercie tous les stagiaires, doctorants et jeunes CDD de l'Ifremer avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger et de passer d'excellents moments. Merci Théo pour ta chaleur humaine et ton soutien durant toute la durée du stage. Enfin, j'aimerais saluer tout particulièrement Aurel, qui a plongé avec moi dans le grand bain du projet DELMOGES, et à Hugo, qui m'a supporté durant chacun des matchs de l'AS Saint-Étienne et avec qui j'ai adoré suivre le parcours du combattant de Tania dans les épreuves de Koh-Lanta.

Liste des figures et des tableaux

N° de figure ou de tableau	Pages	Légende courte
Figure 1	3	Carte du golfe de Gascogne.
Figure 2	4	Schéma récapitulatif de la création, de la compréhension et de la valorisation des indices environnementaux.
Figure 3	9	Évolution saisonnière de la température de surface dans le golfe de Gascogne.
Figure 4	10	Patrons spatiaux de température de surface dans le golfe de Gascogne.
Tableau I	11	Mois et EOFs composant les patrons de température de surface.
Figure 5	12	Spatialisation des variations de température.
Figure 6	13	Évolution saisonnière de la concentration en chlorophylle-a du golfe de Gascogne.
Figure 7	14	Patrons spatiaux de concentration en chlorophylle-a dans le golfe de Gascogne.
Tableau II	16	Mois et EOFs composant les patrons de chlorophylle-a.
Figure 8	16	Spatialisation des variations de chlorophylle-a.
Figure 9	18	Variables environnementales forçantes dans le golfe de Gascogne de 1999 à 2021.
Figure 10	19	Partition de variance entre les amplitudes des patrons spatiaux de température de surface et les variables forçantes du golfe de Gascogne.
Figure 11	20	Partition de variance entre les amplitudes des patrons spatiaux de chlorophylle-a et les variables forçantes du golfe de Gascogne.
Figure 12	21	Longueurs moyennes et recrutement des anchois et sardines dans le golfe de Gascogne entre 2000 et 2021.
Figure 13	21	Mortalité du dauphin commun dans le golfe de Gascogne.
Annexe 1	34	Variance expliquée par les 5 premières EOFs des températures de chaque mois.
Annexe 2	34	Variance expliquée par les 5 premières EOFs de chlorophylle-a de chaque mois.
Annexe 3	34	Variance expliquée et significativité des modèles de régressions multiples entre indices environnementaux et variables forçantes.
Annexe 4	34	Coefficients de corrélation et significativité entre les indices environnementaux et les variables de petits poissons pélagiques.
Annexe 5	34	Relations significatives entre les indices environnementaux et les paramètres liés aux niveaux trophiques supérieurs.
Annexe 6	35	Coefficients de corrélation et significativité entre les indices environnementaux et la mortalité par capture des dauphins communs.
Annexe 7	35	Corrélations obtenues à partir de l'Analyse Canonique des Corrélations pour les EOFs de température.
Annexe 8	35	Corrélations obtenues à partir de l'Analyse Canonique des Corrélations pour les EOFs de chlorophylle-a.

Liste des symboles et des abréviations

Abréviation	Description
ACC	Analyse Canonique des Corrélations
AMO	Oscillation Atlantique Multidécennale
AVHRR	Advanced Very High-Resolution Radiometer
EA	Configuration de l'Atlantique Est
EOF	Fonction Orthogonale Empirique
ESA	European Space Agency
DELMOGES	Projet DELphinus MOuvements GESTion
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAO	Oscillation Nord-Atlantique
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OC5	Algorithme empirique pour lier la couleur de l'océan (OC) à une concentration en chlorophylle
ODIMS	OSPAR Data & Information Management System
OSPAR	Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est ou Convention OSPAR
PELGAS	Campagnes PELagique GAScogne
SCA	Configuration Scandinave
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
VIF	Facteur d'Inflation Variable

Symbole	Description	Valeur	Unité (S.I.)
kt	kilotonne	$1,0 \times 10^3$	t
p	p-value	-	-
r^2	Coefficient de détermination	-	-

1. Introduction

Exposés au changement climatique et aux pressions anthropiques, les écosystèmes marins peuvent évoluer de façon soudaine en basculant brusquement dans un état alternatif (Scheffer *et al.*, 2001). De tels basculements, qualifiés de changement de régime, ont été observés dans plusieurs milieux 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, 2004). 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 permettrait 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 constituerait 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).

Le golfe de Gascogne est une région océanique ouverte sur l'Ouest, et délimitée par l'Espagne au Sud et par la France au Nord et à l'Est. Le long de la côte française, la production biologique des eaux côtières est influencée par les panaches des fleuves (Loire, Gironde et Adour) et un patchwork de processus hydrodynamiques intermittents ou saisonniers (upwellings, stratification, gyres, fronts) (Commission OSPAR, 2000). La vulnérabilité des écosystèmes côtiers du golfe de Gascogne aux impacts d'événements extrêmes et aux changements potentiels 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 induit par un réchauffement des eaux (Chust *et al.*, 2022). Toutefois, nous ne savons pas si ces changements touchent

l'ensemble du golfe et si ces derniers peuvent avoir un impact sur des espèces pélagiques telles que les anchois (*Engraulis encrasicolus* ; Linnaeus, 1758), les sardines (*Sardina pilchardus* ; Walbaum, 1792) et les dauphins communs (*Delphinus delphis* ; Linnaeus, 1758).

La méthode des Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) est utilisée depuis longtemps en météorologie et en océanographie physique pour décomposer la variabilité dans le temps et l'espace de séries de cartes. L'indice de l'Oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) est un exemple connu de son application en météorologie sur des champs de pression atmosphérique (Barnston et Livezey, 1987 ; Blessing *et al.*, 2005). L'océanographie spatiale opérationnelle fournit, par ailleurs, des données de température de surface et de concentration de chlorophylle-a depuis plus de 20 ans à travers la production de cartes quotidiennes (<http://marc.ifremer.fr>). Elle permet donc une surveillance continue dans le temps sur de larges échelles spatiales avec des résolutions permettant d'expliquer des changements à des échelles biologiquement pertinentes (Costoya *et al.*, 2015).

Dans le cadre de notre étude, ces informations ont donc été exploitées à l'aide de la méthode des EOFs, puis combinées à d'autres données environnementales et climatiques afin de contextualiser les changements observés dans le golfe. La méthode EOF a été appliquée sur les données de températures de surface et de concentration en chlorophylle-a afin de développer des indices permettant d'identifier et de décrire les changements environnementaux intervenus entre 1999 et 2021. En particulier, la méthode permet de décomposer la variabilité dans l'espace et le temps en estimant des patrons spatiaux de variation et leurs séries temporelles (indices). Ces indices, associés à des cartes, sont utilisés pour interpréter les potentiels changements de régimes à l'œuvre. Les indices ont ensuite été associés à des variables explicatives pour comprendre l'origine de ces évolutions. Enfin, les indices ont été testés statistiquement avec des variables relatives aux petits poissons pélagiques et aux mammifères marins pour déterminer s'ils peuvent expliquer les changements observés dans les niveaux trophiques supérieurs. L'idée étant d'établir un lien entre l'évolution des variables environnementales et les niveaux trophiques supérieurs.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Zone d'étude et cartes satellites

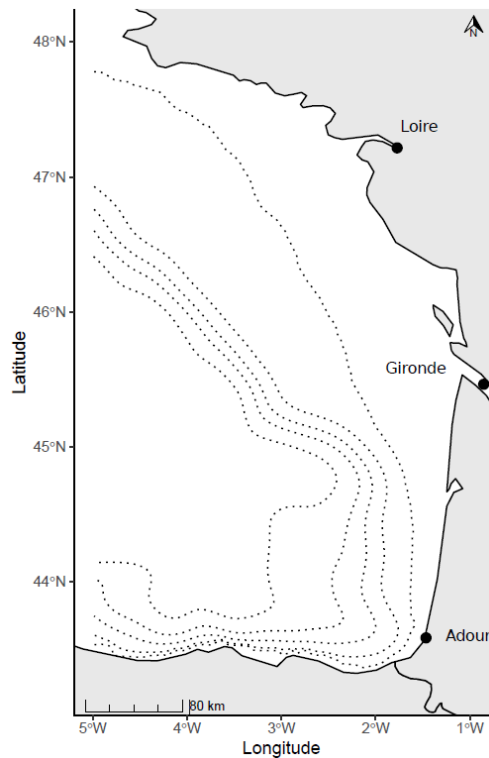


Figure 1. Carte du golfe de Gascogne. Les embouchures de la Loire, de la Gironde, et de l'Adour sont indiquées. Les lignes en pointillés représentent les isobathes tous les 100 mètres de profondeur.

La zone d'étude est une partie du golfe de Gascogne, de 0° à 5°O en longitude et de 43° à 48°N en latitude. La température de surface (°C) et la concentration de surface en chlorophylle-a ($\mu\text{g.L}^{-1}$) sont deux paramètres environnementaux qui sont mesurés quotidiennement par satellite. Les données de température sont obtenues grâce aux Advanced Very High-Resolution Radiometers (AVHRR) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et celles de concentrations en chlorophylle-a par les capteurs Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) et Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et du Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) de l'European Space Agency (ESA). Les données brutes de couleurs de l'eau sont traitées par l'algorithme OC5 (Gohin *et al.*, 2002) pour estimer la concentration en chlorophylle-a et celle-ci est ensuite interpolées selon la méthode décrite par Gohin (2011). Nous avons appliqué une procédure permettant de moyennner les données des cartes satellites (cartes de température de surface et de

concentration en chlorophylle-a) sur une maille spatiale dont la résolution est de 0,25° de longitude et de latitude (Dorand, 2022) et une maille temporelle d'un mois. Nous disposons pour cela d'une série de cartes de 1999 à 2021.

2.2 Méthode des Fonctions Orthogonales Empiriques

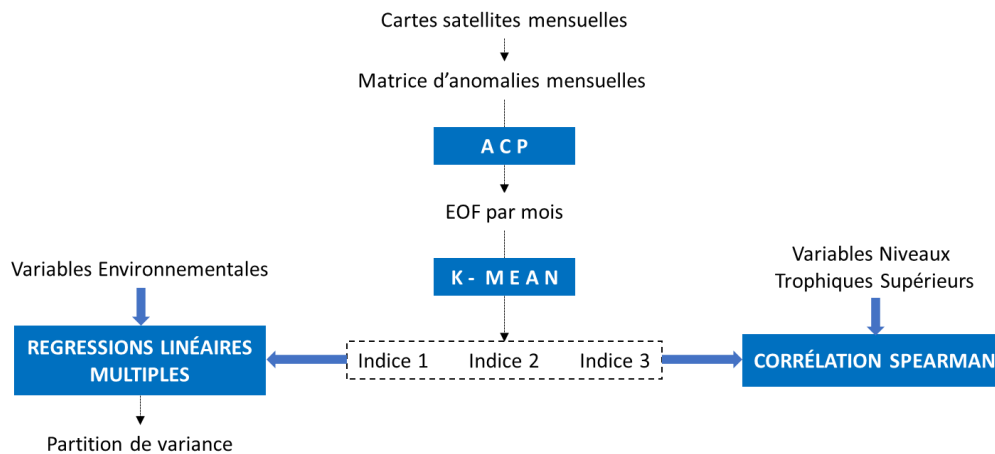


Figure 2. Schéma récapitulatif de la création d'indices environnementaux de température et de concentration en chlorophylle-a, de leur compréhension à l'aide de variables environnementales, et de leur valorisation avec des données de niveaux trophiques supérieurs.

La méthode des Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) permet de décomposer la variabilité spatio-temporelle d'une succession chronologique de cartes pour obtenir des modes spatiaux et leurs séries d'amplitudes temporelles associées (Storch et Zwiers, 1984 ; Hotelling, 1935 ; Pearson, 1901). En d'autres termes, elle permet une factorisation linéaire des composantes spatiales, qui sont constantes dans le temps, et des amplitudes temporelles, qui sont variables dans le temps (Kutzbach, 1967 ; Petitgas *et al.*, 2014), telles que :

$$Z(t, s) = \bar{Z}(\cdot, s) + \sum_{m=1}^q U_m(t) \times E_m^T(s) \quad (1)$$

Où $Z(t, s)$ est la variable étudiée au temps t et située au point s , $\bar{Z}(\cdot, s)$ la valeur moyenne de la variable sur la période étudiée aux coordonnées s , $E_m(s)$ les vecteurs propres ou EOF qui ne sont autres que les modes spatiaux, $U_m(t)$ les composantes principales ou amplitudes temporelles associées à chaque vecteur propre. Pour réaliser cette décomposition, une matrice $Z(t, s)$ est tout d'abord construite. Les lignes de cette dernière correspondent aux cartes maillées et les colonnes à une localisation géographique des cartes. Pour chaque cellule de la matrice $Z(t, s)$, on soustrait la moyenne temporelle calculée sur la période étudiée afin

d'obtenir une matrice d'anomalies $X(t, s)$ sur laquelle appliquer une Analyse en Composante Principale (ACP).

$$X(t, s) = Z(t, s) - \bar{Z}(\cdot, s) \quad (2)$$

Les vecteurs propres (EOF) et les composantes principales (amplitudes temporelles) sont calculés à partir de la matrice de covariance de $X(t, s)$. La méthode des EOFs a été appliquée pour chaque mois. On obtient ainsi plusieurs EOFs par mois ainsi que leurs amplitudes et variances locales expliquées associées. La variance locale expliquée est la proportion de variance à travers le temps expliquée à une localisation précise par rapport à la variance globale à cette localisation :

$$\eta_m = \frac{\text{var}[Y_m](s)}{\sum_m \text{var}[Y_m](s)} \quad (3)$$

$$\text{Où, } Y_m = U_m(t) \times E_m^T(s) \quad (4)$$

Pour construire des indices environnementaux pertinents, une chaîne de traitement a été nécessaire. Tous d'abord, seuls les EOFs expliquant plus de 15% de la variance totale ont été conservés. Puis, compte tenu du fait que le signe des vecteurs propres est arbitraire, les cartes d'EOF ont été standardisées de façon à ce que chacune soit positive au point de coordonnées 47,375°N 2,625°O, situé au large de l'embouchure de la Vilaine.

Comme nous avons plusieurs EOF par mois et que nous cherchons à identifier un petit nombre de patrons spatiaux, nous avons cherché à regrouper les EOF qui se ressemblent. Une classification ascendante hiérarchique est effectuée en utilisant le critère d'agrégation de Ward (Murtagh et Legendre, 2014), minimisant la variance intergroupe, après une ACP sur les EOFs, organisés en colonnes au sein d'une matrice. Le but de cette analyse est de déterminer le nombre de groupes pouvant être définis parmi les EOFs. Une fois ce nombre choisis, le regroupement des différentes EOFs peut être effectué à l'aide de la méthode du k-means. On obtient ainsi des patrons spatiaux moyens.

Pour chaque patron spatial, on calcule finalement :

- Une **variance moyenne** calculée à partir des variances expliquées des EOFs (var) appartenant au groupe G_i considéré. N_i correspond au nombre d'EOF dans le groupe :

$$\overline{var}_i = \left(\frac{1}{N_i}\right) \sum var \in G_i \quad (5)$$

- Une **variance locale moyenne** calculée à partir de toutes les variances locales (η) dans chaque cellule, appartenant au groupe G_i considéré :

$$\overline{\eta(s)}_i = \left(\frac{1}{N_i} \right) \sum \eta(s) \in G_i \quad (6)$$

- Un **patron spatial moyen de variabilité** qui correspond à la moyenne des vecteurs propres (E) appartenant au groupe G_i considéré :

$$\overline{E(s)}_i = \left(\frac{1}{N_i} \right) \sum E(s) \in G_i \quad (7)$$

- Une **amplitude moyenne** par an associée au patron spatial moyen de variabilité. Elle est calculée en faisant la moyenne des amplitudes sur tous les mois j de l'année. Si plusieurs EOFs (indice m) d'un même mois sont présentes dans le groupe G_i , alors l'amplitude du mois est égal à la somme des amplitudes des EOFs. Pour les mois qui ne sont pas présents dans le groupe, l'amplitude est nulle :

$$\bar{U}_i(k) = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \sum_{m=1}^2 d_i \times U_m(j, k) \quad (8)$$

Où $d_i = 1$ si l'EOF du mois $j \in G_i$ et $d_i = 0$ sinon.

Si un patron spatial est de plus en plus important au cours de la série (ou de moins en moins), son amplitude montrera une tendance. La tendance continue linéaire des séries d'amplitudes moyenne a été testée à l'aide d'un test de Mann-Kendall corrigé par Hamed et Rao (1988). Lorsqu'une tendance était significative au seuil d'erreur de première espèce 0,05, on a cherché à quantifier la variation et à la localiser. La procédure suivante a été appliquée. Pour les patrons de concentration de chlorophylle-a, on sélectionne les zones de la carte du patron spatial moyen dont la valeur appartient aux premiers et derniers déciles. Pour les patrons de température de surface, on sélectionne les zones dont la valeur appartient aux premiers et derniers quartiles. Pour chaque zone ainsi définie, on calcule ensuite la moyenne annuelle du paramètre pour les mois inclus dans le groupe d'EOFs. La tendance linéaire des séries obtenues est finalement testée avec le même test corrigé de Mann-Kendall dans chaque zone. Les résultats des analyses EOF dépendent de la période considérée. Si une année est rajoutée, les résultats changeront. Afin de pouvoir actualiser les patrons environnementaux en intégrant des années supplémentaires, deux contrôles ont été mis en place. La composition

des groupes d'EOFs est d'abord vérifiée. Les EOFs de chaque mois sont ensuite comparées à l'aide d'une Analyse Canonique des Corrélations (ACC) afin d'évaluer le niveau de corrélation entre les espaces factoriels des EOFs de la période de n années, et de $n + 1$ années.

2.3 Variables environnementales et niveaux trophiques supérieurs

Pour expliquer les variations dans les séries d'amplitudes annuelles moyennes des patrons spatiaux, les variables environnementales suivantes ont été sélectionnées :

- Les principaux indices atmosphériques exerçant une influence sur le golfe de Gascogne ont été choisis : l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO ; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>), la configuration de l'Atlantique Est (EA ; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>), l'Oscillation Atlantique Multi décennale (AMO ; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/amo.shtml>) et la configuration Scandinave (SCAN ; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml>). Ils se présentent sous la forme de séries d'indices mensuels et sont disponibles sur le site des prédictions climatiques de la NOAA;
- Les débits moyens journaliers ($m^3 \cdot s^{-1}$) des fleuves majeurs du golfe de Gascogne que sont l'Adour, la Loire et la Garonne. Ils ont été moyennés par mois sur la période allant de 1999 à 2021. Afin de construire un indice global des apports fluviaux, les débits de ces trois fleuves ont été sommés. Les données sont disponibles sur l'HydroPortail du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI ; <https://hydro.eaufrance.fr>) ;
- Les flux d'azote et de phosphore ($kt \cdot an^{-1}$) arrivant dans le golfe de Gascogne. Les données annuelles par bassins versants étaient disponibles sur la plateforme de gestion et d'information d'OSPAR (https://odims.ospar.org/en/submissions/ospar_inputs_nutrients_results_2022_06/). Les flux de nutriments des bassins versants du golfe ont été sommés annuellement sur la période allant de 1999 à 2021 ;
- Le vent (vitesse en $m \cdot s^{-1}$ et direction) au point de coordonnées 45,5°N, 2,25°O. Les données sont issues du modèle de Benthamy et Prevost (2021) et ont été extraites par Dorand (2022). La direction des vecteurs vitesse a été déterminée en calculant leur angle :

$$\alpha = 270 - \arctan(u, v) \quad (9)$$

Où u est la composante horizontale du vecteur somme et v la composante verticale du vecteur somme. La somme vectorielle des vecteurs vitesses a ensuite été réalisée pour chaque mois avant d'en calculer le cube pour obtenir un indice de turbulence induite par le vent (Mann et Lazier, 1991).

Pour envisager les effets des variations sur l'écosystème, les indices suivants dans les niveaux trophiques supérieurs ont été sélectionnés :

- La taille moyenne (cm) des anchois et des sardines du golfe de Gascogne à l'âge 1. Cet indice est calculé avec les données des campagnes PELGAS (Doray *et al.*, 2018), menées tous les ans par Ifremer depuis 2000, au mois de mai (Doray *et al.*, 2021) ;
- Le recrutement (abondance à l'âge 1) des anchois et des sardines, exprimés en nombre d'individus. Les valeurs sont estimées à partir des mesures réalisées durant les campagnes PELGAS (ICES, 2022) ;
- La mortalité totale des dauphins communs estimées par PELAGIS sur la période 2010-2021, à partir des échouages (Peltier *et al.*, 2016).

2.4 Corrélations avec les amplitudes d'EOFs

Pour lier les amplitudes annuelles moyennes (associés aux patrons spatiaux d'EOFs) aux variables environnementales sélectionnées, des régressions linéaires multiples ont été réalisées. Seuls les mois représentés dans la fenêtre temporelle des groupes d'EOFs ont été pris en compte. Les données de flux de nutriments, disponibles uniquement à l'échelle de l'année, n'ont été utilisées que pour expliquer le premier patron de concentration en chlorophylle-a compte tenu du fait que tous les mois de l'année font partis de sa fenêtre temporelle.

La non-colinéarité entre variables explicatives a été vérifiée grâce au calcul du Facteur d'inflation variable (VIF : James *et al.*, 2021). La valeur de VIF la plus petite possible est égale à 1. Elle signifie l'absence de colinéarité. Une valeur de VIF supérieure à cinq indique un niveau élevé de colinéarité. Dans ce dernier cas, la variable est supprimée du modèle de régression ou combinée à une autre variable. Enfin, pour identifier la contribution de chaque variable explicative, une partition de variance a été réalisée en appliquant un algorithme de partition hiérarchique (Nally, 2000). Concernant les effets sur l'écosystème, les amplitudes annuelles

moyennes ont été corrélées aux mesures de niveaux trophiques supérieurs sélectionnées à l'aide d'un test de corrélation de Spearman.

3. Résultats

3.1 Température de surface

3.1.1 Évolution saisonnière

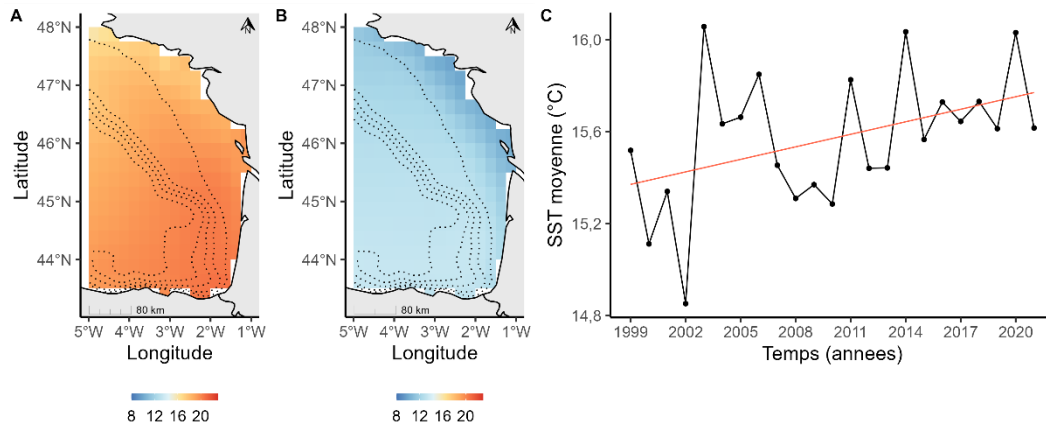


Figure 3. Évolution saisonnière de la température de surface dans le golfe de Gascogne. A et B représente respectivement la température moyenne de surface (en °C) en été (mois de juin, juillet et août) et en hiver (décembre, janvier, février). C représente la température annuelle moyenne de surface (en °C) sur la période 1999-2021. La tendance linéaire de la variation de température, représentée en rouge, a une pente de $0,018^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$ soit une augmentation de $0,42^{\circ}\text{C}$ entre 1999 et 2021.

En été, la température de surface est plus élevée dans le quart Sud-Est du golfe (Figure 3, A). En hiver, on observe un gradient de température côte-large avec des valeurs croissantes à mesure que l'on s'éloigne des côtes françaises (Figure 3, B). Entre 1999 et 2021, la température de surface annuelle moyenne dans le golfe de Gascogne augmente graduellement (Figure 3, C). On observe des minimums à $15,11^{\circ}\text{C}$ et $14,85^{\circ}\text{C}$ en 2000 et 2002, et des pics à $16,05^{\circ}\text{C}$ en 2003 et à $16,03^{\circ}\text{C}$ en 2014 et 2020.

3.1.2 Patrons moyens de variabilité

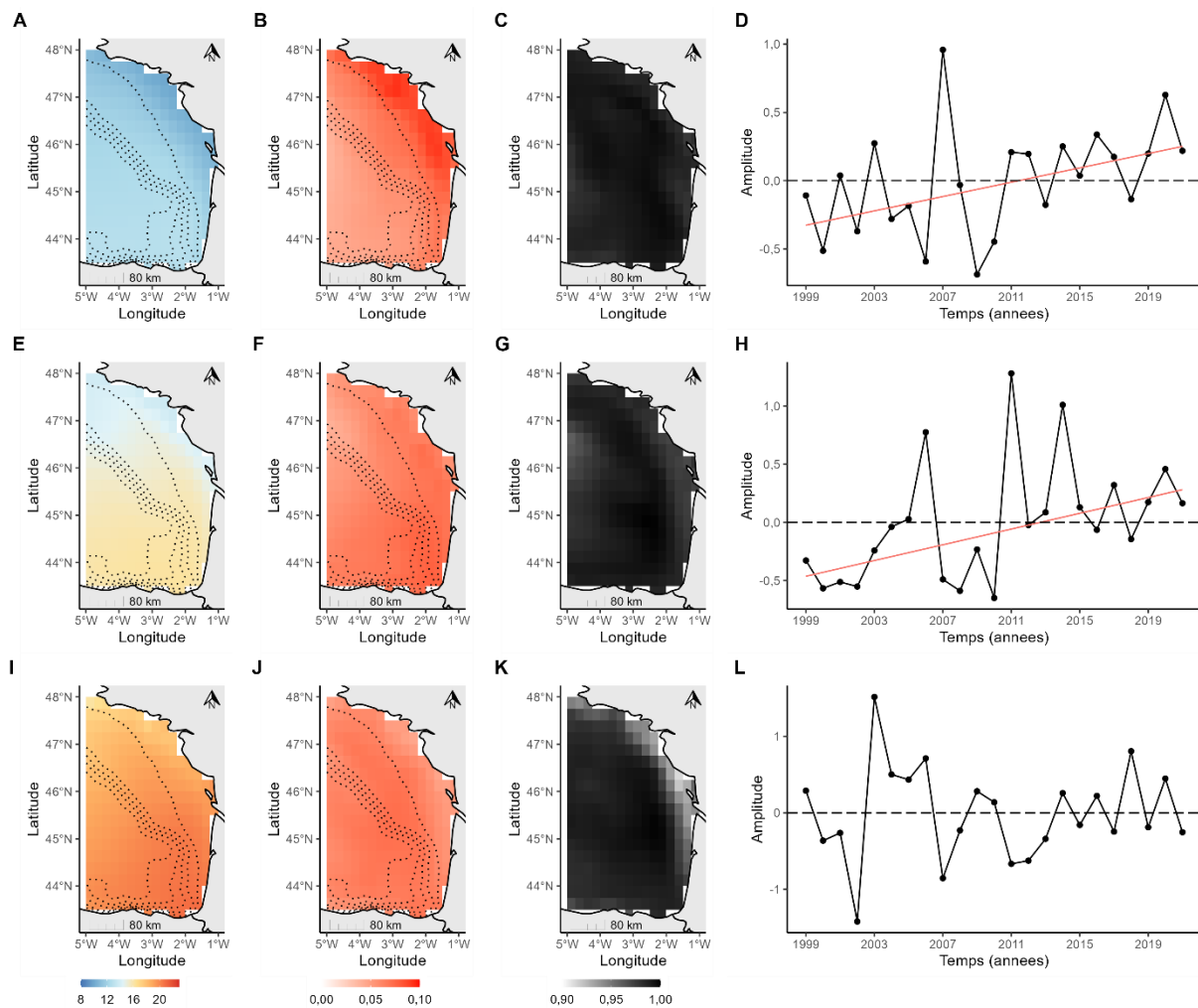


Figure 4. Patrons spatiaux de température de surface dans le golfe de Gascogne, obtenus par le calcul des EOFs et leur regroupement par la méthode des k-means. Chaque ligne correspond à un patron spatial et son indice. La première colonne montre la carte moyenne des températures pour les mois sélectionnés 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.

Trois groupes distincts ont pu être décrits :

- 1) Le **groupe 1** rassemble les EOFs d'ordre 1 pour les mois de janvier, février, mars et avril (Tableau I ; Annexe 1). Il est caractérisé par un gradient de température côte-large avec des eaux plus froides à la côte (Figure 4, A). Les eaux de surface passent ainsi de 8°C le long des côtes françaises à plus de 12°C au large. Le patron spatial moyen associé à ce groupe est positif sur tout le golfe avec des valeurs moyennes d'EOFs plus élevées au niveau de la côte (Figure 4, B). La variance locale expliquée par le patron

est importante sur tout le golfe (Figure 4, C). L'amplitude moyenne croît avec une tendance linéaire significative à un seuil d'erreur de première espèce de 0,1 (Mann Kendall, $p = 0,03$) de pente 0,026 (Figure 4, D). Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*SST-Côte Large-Hiver*' ;

2) Le **groupe 2** rassemble les EOFs d'ordre 1 pour les mois de mai, octobre, novembre et décembre (Tableau I ; Annexe 1). Il est caractérisé par des températures plus élevées dans le quart Sud-Est du golfe (Figure 4, E). Les eaux de surface ont effectivement une température environ égale à 16°C au niveau de cette zone. Le patron spatial moyen est positif dans tout le golfe avec des valeurs moyennes d'EOFs plus élevées dans le quart Sud-Est (Figure 4, F). La variance locale expliquée par le patron est très élevée sur tout le golfe (Figure 4, G). L'amplitude moyenne croît avec une tendance linéaire significative à un seuil d'erreur de première espèce de 0,1 (Mann Kendall, $p = 0,007$) de pente 0,03 (Figure 4, H). Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*SST-Nord Sud-Transition*' ;

3) Le **groupe 3** est composé des premiers EOFs 1 pour les mois de juin, juillet, août et septembre (Tableau I ; Annexe 1). Il est caractérisé par des températures moins élevées dans la moitié Nord du golfe (Figure 4, I). On retrouve effectivement des eaux à plus de 20°C dans la moitié sud du golfe, 16°C à 17°C dans la moitié nord. Le patron spatial moyen est très homogène, mais on retrouve des valeurs d'EOFs plus faibles le long de la côte (Figure 4, J). La variance locale expliquée est également plus faible le long de la côte (Figure 4, K). L'amplitude moyenne de ce patron ne varie pas avec une tendance monotone significative (Mann Kendall, $p = 0,91$) (Figure 4, L). Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*SST-Homogène-Été*'.

Tableau I. Mois et EOFs composant les patrons de température de surface de chaque groupe. La valeur 1 indique la présence de l'EOF dans le patron du groupe, et – son absence.

Groupe 1 SST-Côte Large-Hiver												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Groupe 2 SST-Nord Sud-Transition												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1
Groupe 3 SST-Homogène-Été												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-

3.1.3 Spatialisation des variations de température

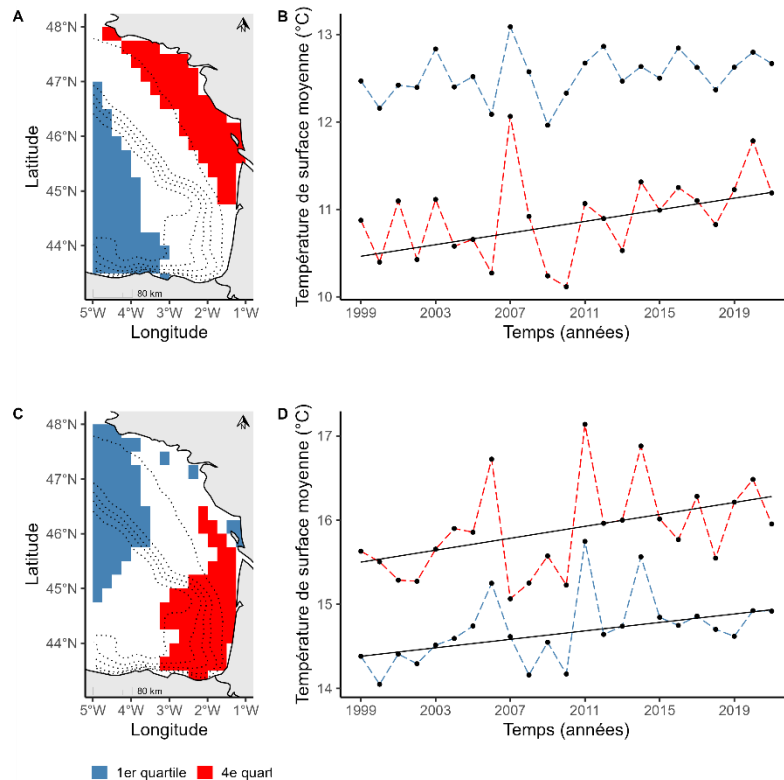


Figure 5. Spatialisation des variations de température. A et B correspondent au groupe 1 des EOF (patron SST-Côte Large-Hiver), C et D au groupe 2 (SST-Nord Sud-Transition). La première colonne montre les cellules du patron moyen de variabilité représentant le premier (bleu) et le dernier (rouge) quartile. La deuxième colonne montre la température de surface (en °C) annuelle moyenne calculée pour les zones sélectionnées. La ligne noire indique que la pente de la tendance monotone linéaire (Mann-Kendal) est significative. Elle est égale à $0,03^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$ pour la zone du dernier quartile du groupe 1 et à respectivement $0,025$ et $0,035^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les zone du premier et du dernier quartile du groupe 2.

L'augmentation des températures associées aux patrons SST-Côte Large-Hiver et SST-Nord Sud-Transition ont été quantifiées. Pour le patron SST-Côte Large-Hiver, les cellules appartenant au premier quartile sont situées dans le quart Sud-Ouest du golfe de Gascogne. Les cellules appartenant au dernier quartile sont, quant à elles, situées au niveau du plateau continental, le long du littoral français (Figure 5, A). La température annuelle moyenne est plus élevée au large qu'au niveau du littoral français (Figure 5, B). La température annuelle moyenne croît avec une tendance linéaire significative le long des côtes françaises (Mann Kendall, $p = 0,05$) avec une pente de $0,03^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$, ce qui n'est pas le cas pour la zone située au large (Figure 5, B). Cela représente une augmentation de $0,69^{\circ}\text{C}$ sur la période d'étude dans la bande côtière en hiver. Pour le patron SST-Nord Sud-Transition, les cellules appartenant au premier quartile sont principalement localisées dans le quart Nord-Ouest du

golfe de Gascogne. Les cellules appartenant au dernier quartile sont quant à elles situées dans le quart Sud-Est du golfe (Figure 5, C). La température annuelle moyenne dans le quart Sud-Est du golfe est plus élevée que celle de la zone du premier quartile (Figure 5, D). La température de la zone du premier quartile (Mann Kendall, $p = 0,002$) et du dernier quartile (Mann Kendall, $p = 0,03$) augmente avec une tendance linéaire significative et avec des pentes respectivement égales à $0,025$ et $0,035^{\circ}\text{C}.an^{-1}$ (Figure 5, D). Cela représente une augmentation de $0,57^{\circ}\text{C}$ au large et de $0,80^{\circ}\text{C}$ sur le plateau au Sud du golfe durant les mois de transition.

3.2 Concentration en chlorophylle-a

3.2.1 Évolution saisonnière

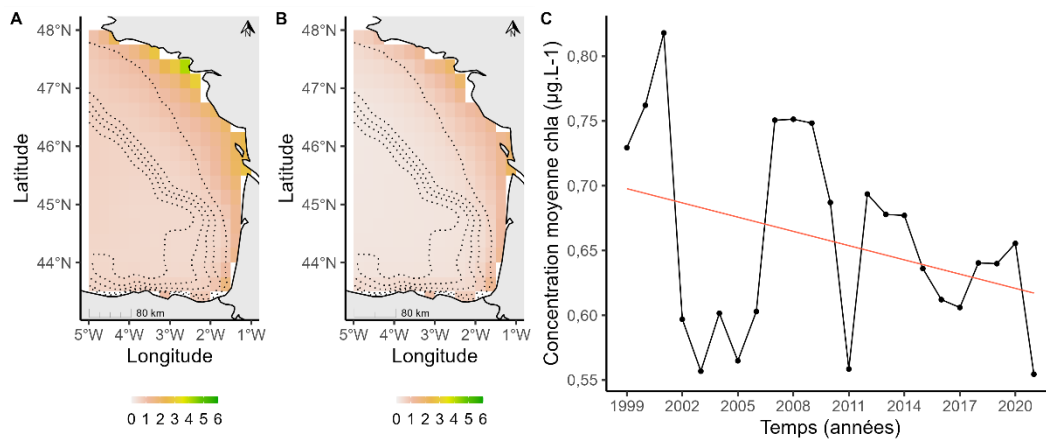


Figure 6. Évolution saisonnière de la concentration en chlorophylle-a dans le golfe de Gascogne. A et B représente respectivement la concentration moyenne en chlorophylle-a (en $\mu\text{g}.L^{-1}$) au printemps (mois de mars, avril, mai) et en hiver (décembre, janvier, février). C représente la concentration annuelle moyenne en chlorophylle-a sur la période 1999-2021. La ligne rouge montre la tendance linéaire de la variation de la concentration en chlorophylle-a de pente $-0,004 \mu\text{g}.L^{-1}$ par an soit une diminution moyenne de $0,092 \mu\text{g}.L^{-1}$ entre 1999 et 2021.

Les cartes de concentration en chlorophylle-a moyenne montrent, au printemps comme en hiver, un gradient côte-large avec des concentrations plus élevées à la côte (Figure 6, A et B). Cette situation est très marquée au printemps avec des valeurs de fortes concentrations au niveau des estuaires (Figure 6, A). La concentration annuelle moyenne en chlorophylle-a décroît entre 1999 et 2021 (Figure 6, C).

3.2.2 Patrons moyens de variabilité

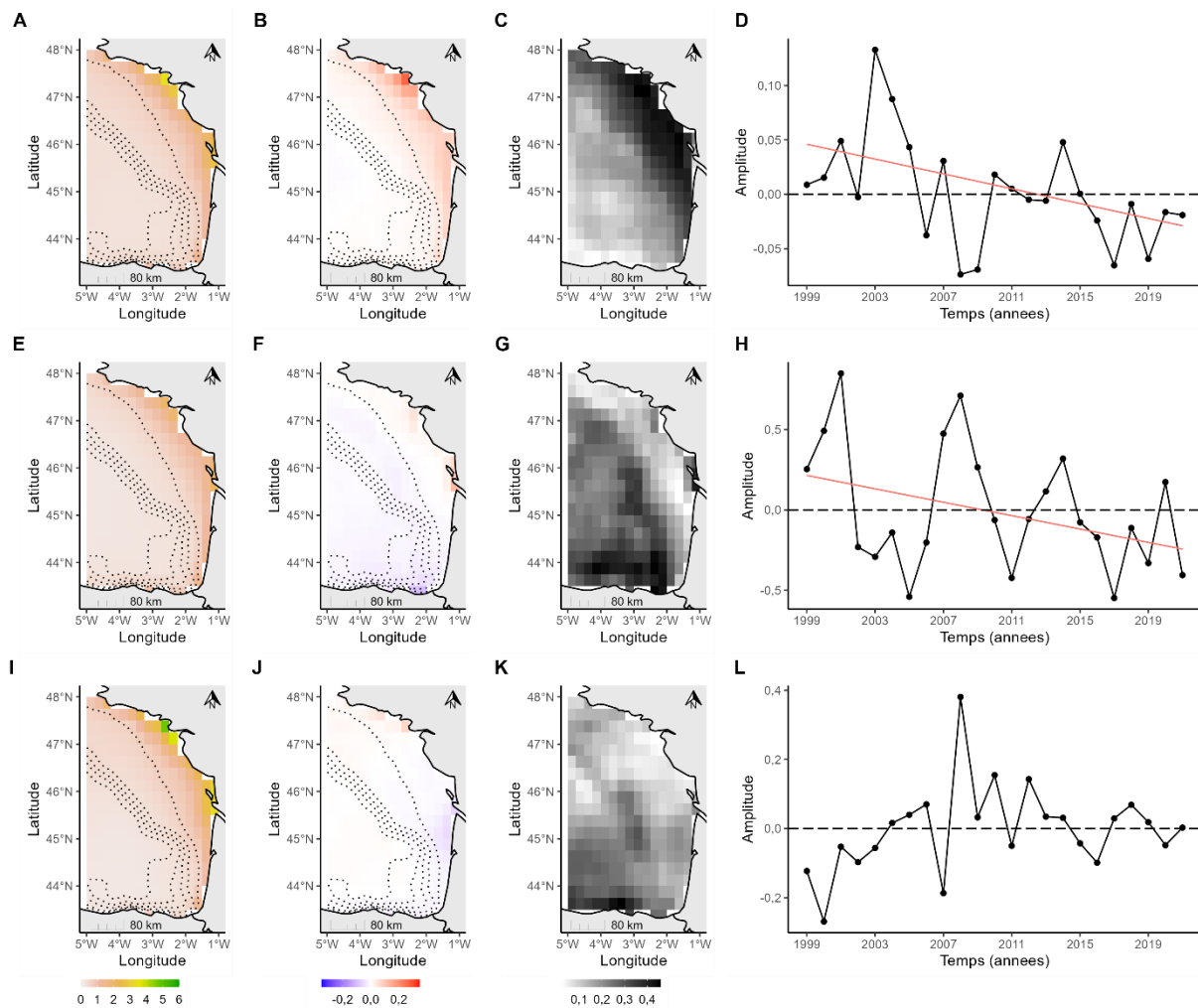


Figure 7. Patrons spatiaux de concentration en chlorophylle-a dans le golfe de Gascogne, obtenus par la méthode des EOFs et le regroupement des EOFs par k-means. Chaque ligne correspond à un patron spatial et son indice. La première colonne montre la carte moyenne des concentrations pour les mois sélectionnés 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.

Trois groupes ont pu être définis lors de l'analyse des EOFs mensuels de la concentration en chlorophylle-a :

- 1) Le **groupe 1** est composé des EOFs d'ordre 1 pour tous les mois de l'année ainsi que de l'EOF d'ordre 2 d'avril (Tableau II ; Annexe 2). Il est caractérisé par un gradient côte-large avec des concentrations en chlorophylle-a plus élevées au niveau de la côte et particulièrement aux embouchures de la Loire et de la Gironde (Figure 7, A). On

observe effectivement des concentrations qui peuvent être supérieures à $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ le long de la côte et au niveau des embouchures des fleuves. On retrouve ce gradient pour le patron moyen de variabilité, avec des valeurs d'EOFs plus élevées le long de la côte (Figure 7, B). La variance locale expliquée par le patron est importante sur le plateau continental (Figure 7, C). L'amplitude moyenne est caractérisée par une alternance de pics positifs et négatifs. Globalement, l'amplitude décroît avec une tendance monotone linéaire significative à un seuil d'erreur de première espèce de 0,1 (Mann Kendall, $p = 0,02$) de pente -0,02 (Figure 7, D). Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*CHLA-Cote Large-Annuel*' ;

2) Le **groupe 2** est composé des EOFs d'ordre 2 des mois de janvier, février, novembre et décembre (Tableau II ; Annexe 2). Il est caractérisé par des concentrations en chlorophylle-a plus élevées au niveau du plateau continental et devant les estuaires de la Loire et la Gironde (Figure 7, E). On retrouve effectivement des concentrations maximales de $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau des estuaires. Le patron moyen de variabilité forme un dipôle, avec des valeurs d'EOFs positives sur le plateau continental, et négatives au large (Figure 7, F). La variance locale expliquée par le patron est importante au-delà du plateau continental ainsi qu'au large des embouchures de la Loire et de la Gironde (Figure 7, G). L'amplitude moyenne l'amplitude décroît avec une tendance monotone linéaire significative à un seuil d'erreur de première espèce de 0,1 (Mann Kendall, $p = 0,01$) de pente -0,003 (Figure 7, H). Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*CHLA-Plateau-Hiver*' ;

3) Le **groupe 3** est composé des EOFs d'ordre 2 des mois de mai, juin, août et septembre (Tableau II ; Annexe 2). Il est caractérisé par de fortes concentrations en chlorophylle-a proche de la côte dans le sud Bretagne (Figure 7, I). Des concentrations comprises entre $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $6 \mu\text{g.L}^{-1}$ peuvent ainsi être observées au Sud de la Bretagne, au niveau de l'estuaire de la Vilaine. Le patron moyen de variabilité se caractérise par des valeurs d'EOFs positives au Sud de la Bretagne et négatives dans le quart Sud-Est du golfe (Figure 7, J). L'amplitude moyenne de ce patron ne varie pas avec une tendance monotone significative (Mann Kendall, $p = 0,24$) (Figure 7, L). On note cependant une période de croissance entre 1999 et 2006. Compte tenu des caractéristiques du patron de ce groupe, il sera nommé '*CHLA-Sud Bretagne-Transition*'.

Tableau II. Mois et EOFs composant les patrons de concentrations en chlorophylle-a de chaque groupe, déterminé par k-means. La valeur 1 indique la présence de l'EOF dans le patron du groupe, et – son absence.

Groupe 1 CHLA-Côte Large-Annuel												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
EOF2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Groupe 2 CHLA-Plateau-Hiver												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EOF2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Groupe 3 CHLA-Sud Bretagne-Transition												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EOF2	-	-	-	-	1	1	-	1	1	-	-	-

3.2.3 Spatialisation des variations de chlorophylle-a

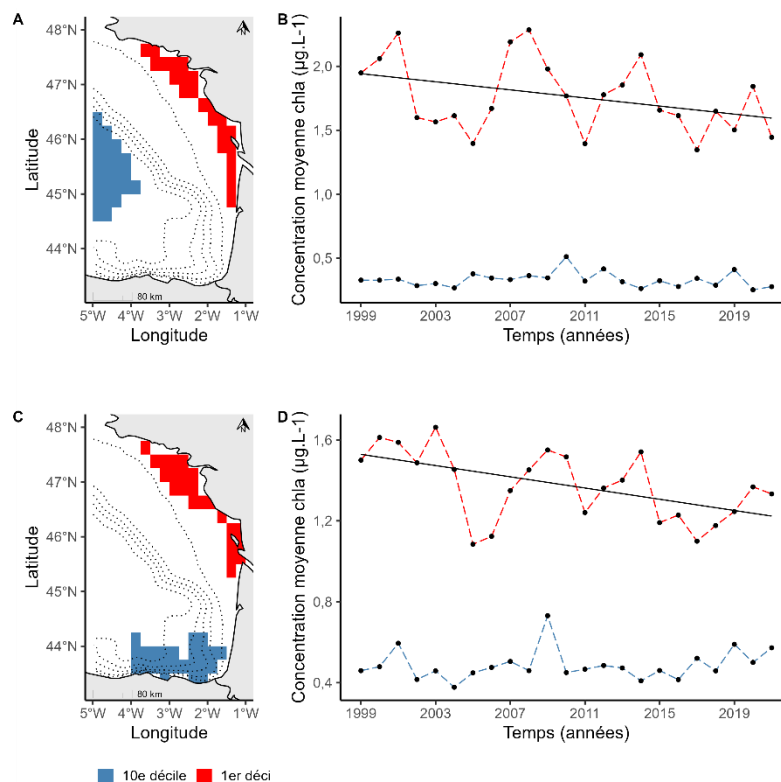


Figure 8. Spatialisation des variations de chlorophylle-a. A et B représente la quantification pour le premier groupe (CHLA-Côte Large-Annuel) et C et D celle pour le deuxième groupe (CHLA-Plateau-Hiver). La première colonne montre les cellules du patron moyen de variabilité sélectionnées par le calcul des déciles. La deuxième colonne montre la concentration en chlorophylle-a annuelle moyenne (en $\mu g. L^{-1}$) calculée pour les zones déciles sélectionnées. La ligne noire indique que la pente de la tendance linéaire (Mann-Kendal) est significative. Les pentes sont égales à $-0,01 \mu g. L^{-1}$ par an pour la zone du quatrième quartile des groupe 1 et 2.

Les tendances significatives en chlorophylle-a en lien avec les patrons CHLA-Côte Large-Annuel et CHLA-Plateau-Hiver, ont été quantifiées. Pour le patron CHLA-Côte Large-Annuel, les zones appartenant au premier décile sont localisées au niveau du littoral français entre 44,5 et 48°N (Figure 8, A). Les cellules appartenant au dernier décile sont quant à elles situées au large des côtes françaises et espagnoles, entre 4 et 5°O (Figure 8, A). Dans la zone côtière, la concentration annuelle moyenne en chlorophylle-a est jusqu'à quatre fois supérieure par rapport à celle de la zone située plus au large (Figure 8, B). Par ailleurs, la concentration annuelle moyenne décroît avec une tendance linéaire significative le long des côtes françaises (Mann Kendall, $p = 0,01$) avec une pente de $-0,01 \mu g. L^{-1}$, contrairement à la zone du large (Mann Kendall, $p = 0,40$) (Figure 8, B). Cela correspond à une diminution de $0,23 \mu g. L^{-1}$ entre 1999 et 2021 sur la bande côtière, toute saison confondue. Pour le patron CHLA-Plateau-Hiver, les cellules appartenant au premier décile sont localisées dans une zone côtières s'étendant entre 44,5 et 47,5°N (Figure 8, C). Les cellules appartenant au dernier décile sont, quant à elles, situées dans le Sud du golfe de Gascogne, en dessous de 44°N de latitude (Figure 8, D). La concentration moyenne en chlorophylle-a en hiver est jusqu'à quatre fois plus élevées dans la zone côtière par rapport à celle de la zone située au Sud du golfe (Figure 8, D). Par ailleurs, la concentration annuelle moyenne en chlorophylle-a baisse selon une tendance linéaire significative (Mann Kendall, $p = 0,0004$) avec une pente de $-0,01 \mu g. L^{-1}$, contrairement à celle de la zone Sud (Mann Kendall, $p = 0,30$). Cela correspond à une diminution de $0,23 \mu g. L^{-1}$ entre 1999 et 2021 au large de la Gironde et de la Loire, en hiver. Pour cette zone, on note toutefois une augmentation de la concentration moyenne en chlorophylle-a à partir de 2015 (Figure 8, D).

3.3 Variables environnementales

3.3.1 Évolutions annuelles et saisonnières

Le débit cumulé de la Loire, de la Garonne, et de l'Adour sont globalement constant sur la période 1999-2021. On observe néanmoins des minimums à $1151 m^3. s^{-1}$ en 2005, à $975 m^3. s^{-1}$ en 2011 et à $1003 m^3. s^{-1}$ en 2017, ainsi que des maximums à $2310 m^3. s^{-1}$ et $2418 m^3. s^{-1}$ en 2001 et 2013 (Figure 9, A). Les apports en azote sont également constants avec des flux annuels compris entre $200 kt$ et $300 kt$ (Figure 9, B). À l'inverse, les apports en phosphore dans le golfe de Gascogne ont diminué, passant de $15 kt$ à moins de $10 kt$ en 20 ans (Figure 9, C). Le golfe de Gascogne est sous l'influence majeure des vents d'ouest (Borja

et al., 2019). On notera cependant que l'année 2020 se distingue des autres par l'importance des vents d'est (Figure 9, E). Enfin, on observe que l'indice climatique EA a augmenté de façon importante en été depuis 1999, à l'inverse de la NAO. Le SCAN a, quant à lui, des déviations positives en automne, et négatives au printemps (Figure 9, D).

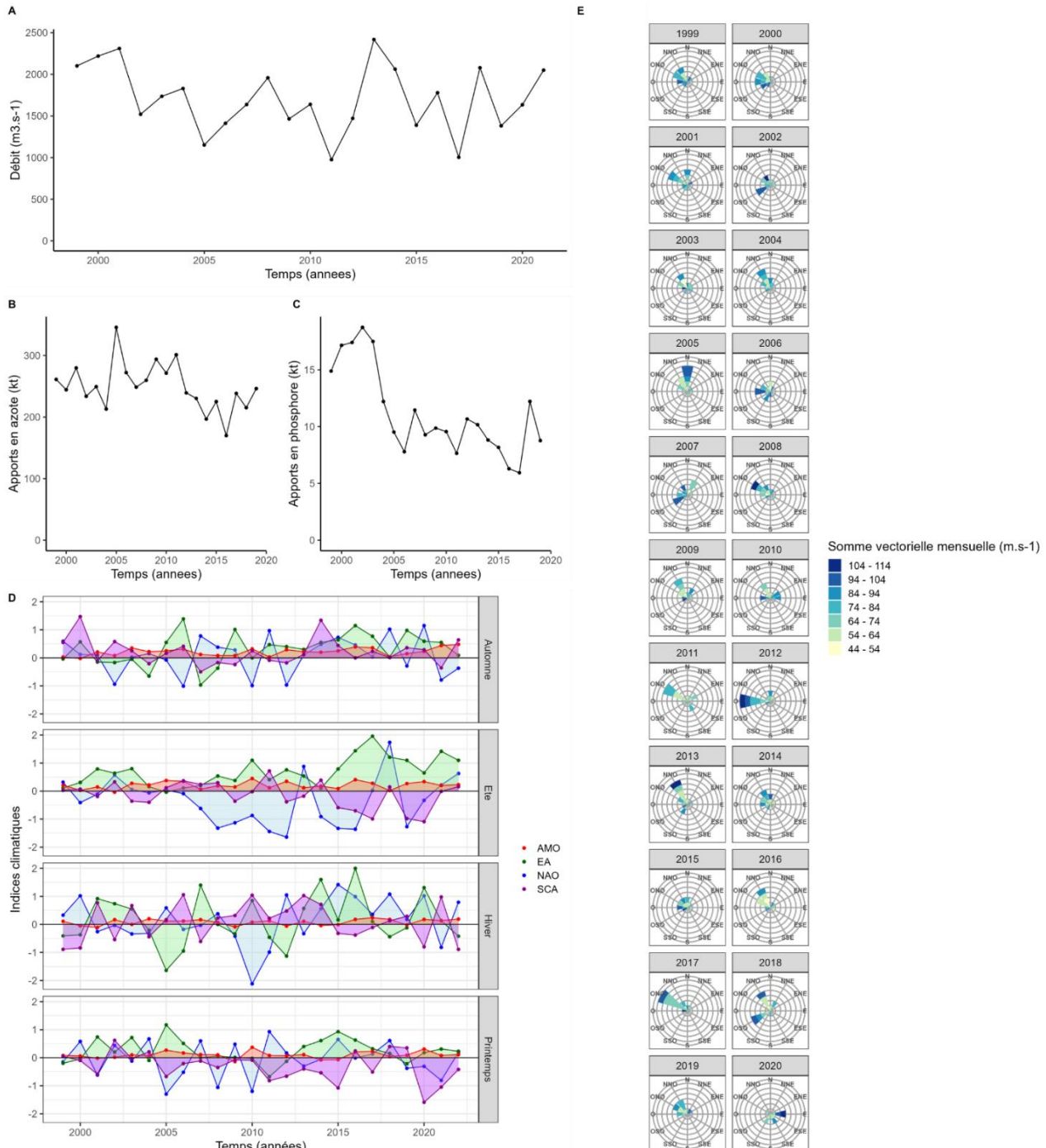


Figure 9. Variables environnementales forçantes dans le golfe de Gascogne de 1999 à 2021. A représente les débits annuels (en $m^3 \cdot s^{-1}$) de la Loire, de la Garonne et de l'Adour sommés. B et C représentent respectivement les flux totaux annuels d'azote et de phosphore (en kt) entrant dans le golfe de Gascogne. D montre l'évolution des indices atmosphériques. E montre la direction et l'intensité du vent (en $m \cdot s^{-1}$) au point de coordonnées $45,5^\circ N$ et $2,25^\circ O$.

3.3.2 Partition de variance

Les modèles linéaires multiples expliquent respectivement 53% et 36% de la variance totale des patrons SST-Côte Large-Hiver et SST-Nord Sud-Transition (Annexe 3). L'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) est la variable environnementale qui explique le plus de variance dans les modèles linéaires multiples expliquant les amplitudes des patrons spatiaux SST-Cote Large-Hiver et SST-Nord Sud-Transition (Figure 10, A et D). L'EA et l'AMO expliquent ensuite le plus l'amplitude du patron SST-Cote Large-Hiver (Figure 10, A). L'AMO explique également une part notable de l'amplitude de SST-Nord Sud-Transition avec le débit des fleuves (Figure 10, D).

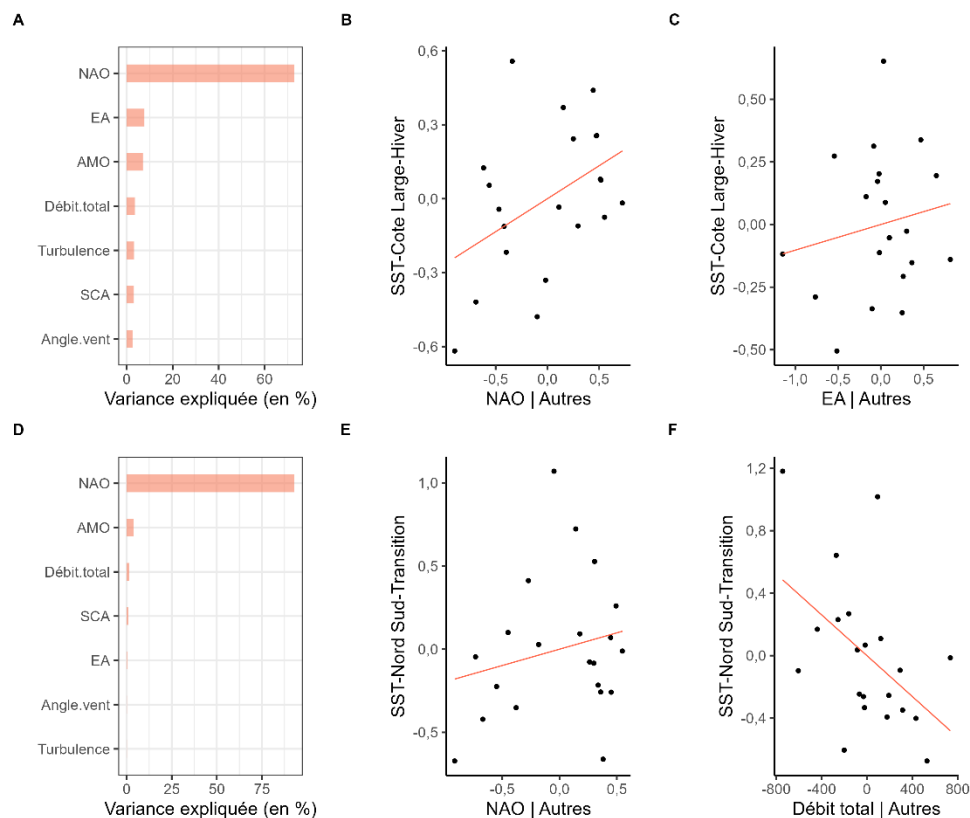


Figure 10. Partition de variance du modèle linéaire multiple entre les amplitudes des patrons spatiaux de SST et les variables forçantes du golfe de Gascogne. La première ligne correspond au patron SST-Cote Large-Hiver et la seconde au patron SST-Nord Sud-Transition. La première colonne montre le pourcentage de variance du modèle linéaire multiple. Les deux autres colonnes montrent les effets des variables sur les amplitudes. Les variables retenues sont celles représentant une part de variance importante dans le modèle linéaire multiple. La ligne rouge illustre la pente de régression linéaire.

Les modèles linéaires multiples expliquent respectivement 79% et 29% de la variance totale des patrons CHLA-Côte Large-Annuel et CHLA-Plateau-Hiver (Annexe 3). Les nutriments et l'AMO expliquent le plus la variance de l'indice CHLA-Cote Large-Annuel (Figure 11, A). Le phosphore se démarque des deux autres variables en expliquant 40% de la variance du

modèle linéaire (Figure 11, A). L'AMO explique également une part notable de la variance de l'indice CHLA-Plateau-Hiver (Figure 11, D). Toutefois, la turbulence et le débit des fleuves sont les deux variables expliquant le plus la variance de l'indice CHLA-Plateau-Hiver (Figure 11, D).

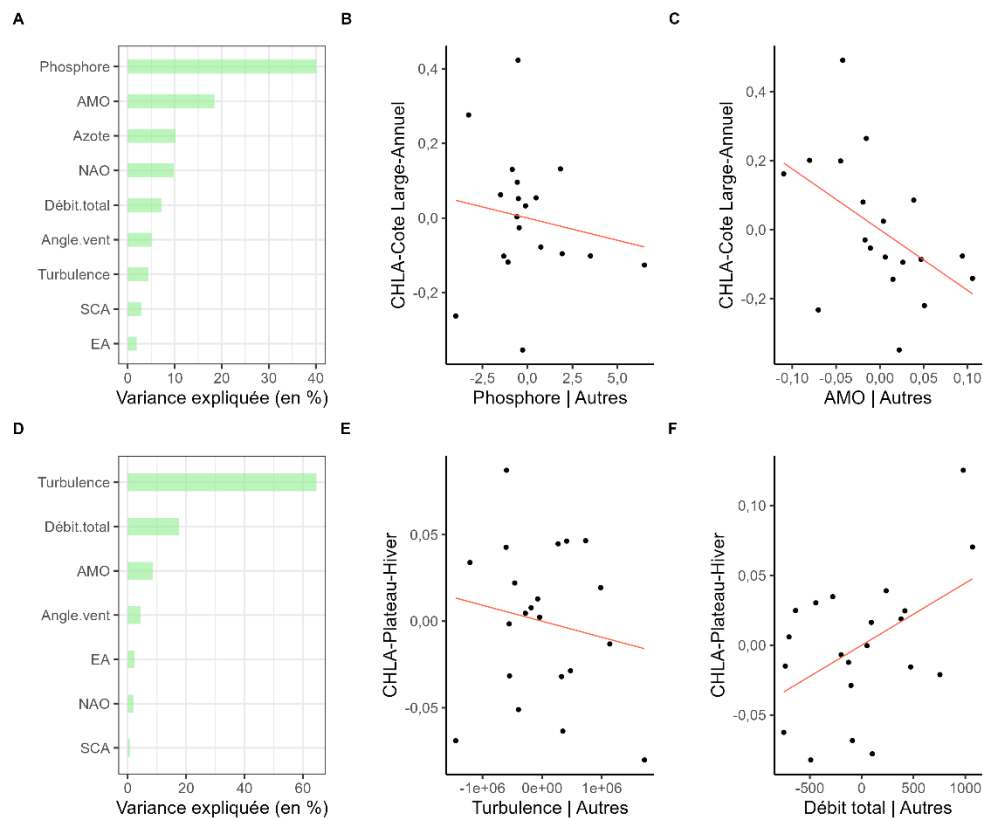


Figure 11. Partition de variance du modèle linéaire multiple entre les amplitudes des patrons spatiaux de chlorophylle-a et les variables forçantes du golfe de Gascogne. La première ligne correspond au patron CHLA-Cote Large-Annuel et la seconde au patron CHLA-Plateau-Hiver. La première colonne montre le pourcentage de variance du modèle linéaire multiple. Les deux autres colonnes montrent les effets sur les amplitudes des variables qui représentent une part de variance importante dans le modèle linéaire multiple. La ligne rouge illustre la pente de régression linéaire.

3.4 Effets des indices satellitaires sur les niveaux trophiques supérieurs

3.4.1 Petits poissons pélagiques

La longueur moyenne des anchois et des sardines à l'âge 1 décroît (Figure 12, A et B) avec une baisse de d'environ 2 cm pour l'anchois (Figure 12, A), et de plus de 4 cm pour la sardine (Figure 12, B). Parallèlement à cela, le recrutement, estimé en nombre d'individus d'âge 1 an, augmente (Figure 12, C et D). On note un recrutement particulièrement important pour les anchois en 2015 (Figure 12, C).

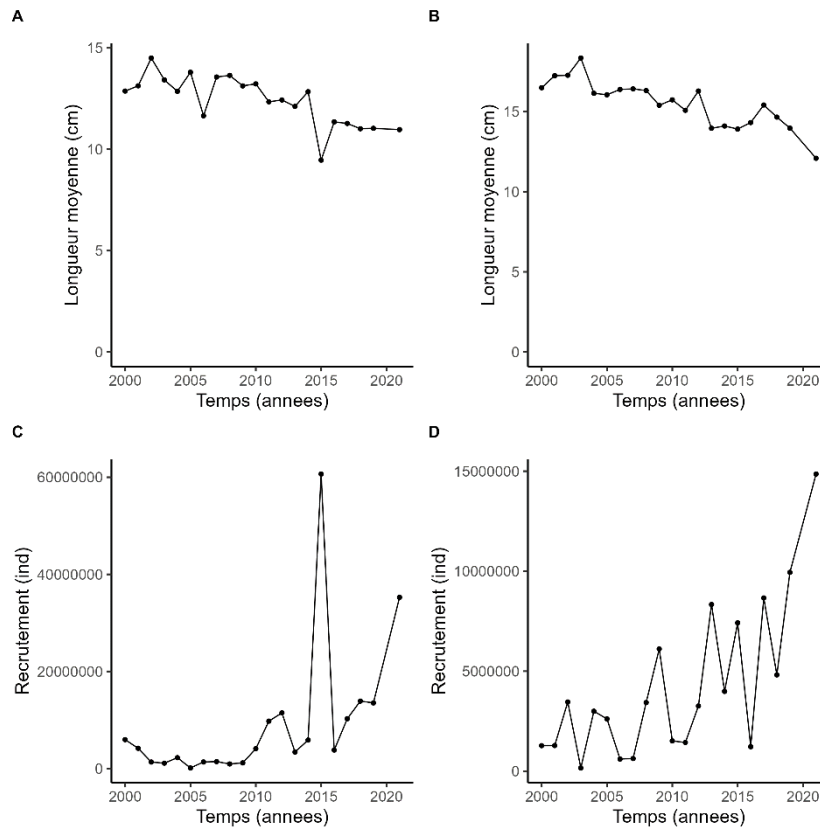


Figure 12. Longueur moyenne (A, B) et recrutement à l'âge 1 (C, D) de l'anchois (gauche) et la sardine (droite) dans le golfe de Gascogne, de 2000 à 2021.

L'amplitude du patron spatial SST-Nord Sud-Transition est négativement corrélé avec la longueur moyenne des anchois (Spearman, $p = 0,003$) à l'âge 1 avec un coefficient de -0,63 (Annexe 4 ; Annexe 5). Il est en de même chez la sardine (Spearman, $p = 0,008$) avec un coefficient de -0,57 (Annexe 6 ; Annexe 7). L'amplitude du patron spatial CHLA-Plateau-Hiver est quant à lui négativement corrélé (Spearman, $p = 0,03$) au recrutement à l'âge 1 de la sardine avec un coefficient de -0,48 (Annexe 4 ; Annexe 5).

3.4.2 Mammifères marins

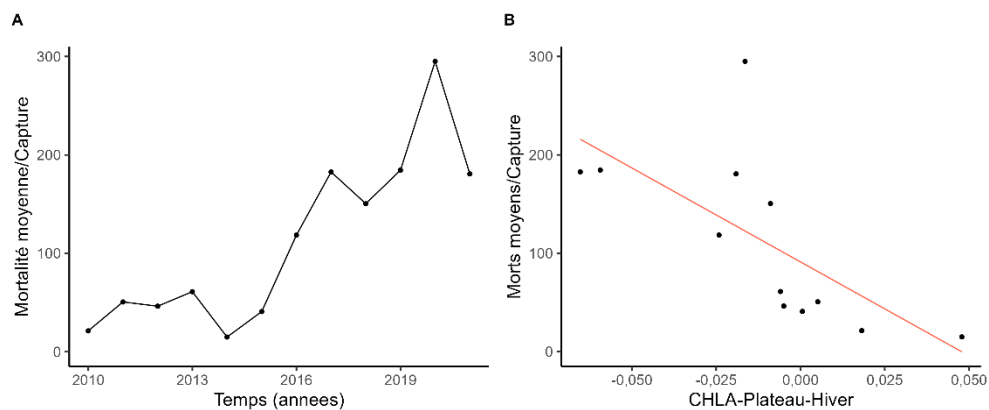


Figure 13. Mortalité (A) du dauphin commun dans le golfe de Gascogne, de 2010 à 2021 sa relation (B) avec l'amplitude du patron spatial CHLA-Plateau-Transition.

La mortalité augmente avec une augmentation nette depuis 2016 (Figure 13, A). Elle est corrélée négativement (Spearman, $p = 0,0003$) de façon significative à l'indice du patron spatial CHLA-Plateau-Hiver avec un coefficient de -0.87 (Annexe 6).

4. Discussion

L'application de la méthode des EOFs et des procédures d'analyse a permis de mettre en évidence des structures spatiales et le calcul d'indices associées sur la période allant de 1999 à 2021. On observe ainsi un réchauffement significatif de $0,69^{\circ}\text{C}$ des eaux de surfaces au niveau du plateau continental en hiver et de $0,80^{\circ}\text{C}$ dans le quart Sud-Est du golfe au printemps et en automne. La concentration en chlorophylle-a, proxy biomasse du phytoplancton des eaux de surface, décroît significativement de $0,23 \mu\text{g.L}^{-1}$ au niveau du plateau continental en hiver, et de $0,23 \mu\text{g.L}^{-1}$ le long du littoral français pour tous les mois de l'année.

Les modèles linéaires multiples et les partitions de variance révèlent que l'indice NAO explique plus de 70% des amplitudes des patrons spatiaux de température. L'amplitude du gradient côte-large de concentration en chlorophylle-a est principalement expliquée par les flux de nutriments, ainsi que par l'AMO. L'amplitude associée au patron CHLA-Plateau-Hiver est majoritairement expliquée par la turbulence induite par le vent et par le débit des fleuves.

Deux séries d'amplitudes sont corrélées significativement aux niveaux trophiques supérieurs. La longueur des sardines et des anchois à l'âge 1 sont ainsi liés à la série d'amplitude du patron spatial SST-Nord Sud-Transition. Le recrutement à l'âge 1 des sardines

et la mortalité des dauphins communs (captures accidentelles) sont liés à la série d'amplitude du patron CHLA-Plateau-Hiver.

4.1 Évolution de la température de surface

En hiver, les eaux de surface situées au niveau des côtes françaises se sont réchauffées de façon significative (Figure 5, B). La hausse cumulée est égale à +0,69°C entre 1999 et 2021. Plusieurs travaux ont été menés sur l'évolution de la température des eaux côtières du golfe de Gascogne. Lima et Wethey (2012) montrent que ces dernières se sont réchauffées, en moyenne, de +0,25°C entre 1982 et 2010. Gómez-Gesteira *et al.* (2008) montrent également un réchauffement des eaux côtières sur la période 1985-2005.

Durant les mois de transitions (printemps et automne), les eaux de surfaces se réchauffent aussi, mais de façon différenciée (Figure 5, C et D). Dans le quart Nord-Ouest du golfe, on quantifie la hausse à +0,57°C. Dans le quart Sud-Est, cette hausse est de +0,80°C sur la même période. Koutsikopoulos *et al.* (1998) ont montré que le quart Sud-Est du golfe se réchauffait plus rapidement sur la période allant de 1972 à 1993, avec une hausse moyenne de la température de surface de +1,4°C. Planque *et al.* (2003) montre également un réchauffement différencié du quart Sud-Est du golfe entre 1971 et 1998.

Aucune tendance linéaire significative n'a en revanche été détectée en été, entre 1999 et 2021 (Figure 4, L). Ce résultat diffère de Costoya *et al.* (2015) qui ont montré un réchauffement significatif des eaux de surface durant la période estivale associé à une multiplication des événements extrêmes.

L'indice NAO est la variable prédictive expliquant le plus la variance des amplitudes des patrons spatiaux de température pour l'hiver et les mois de transition (Figure 10, A et D). Costoya *et al.* (2015) ont aussi montré une corrélation positive entre la NAO et les anomalies de températures d'hiver au niveau des côtes françaises, entre 1982 et 2014. De plus, Michel *et al.* (2009) indiquent que l'indice NAO est le premier mode de variabilité interannuelle de la température de surface dans le golfe de Gascogne. Nos résultats confirment donc l'influence de la NAO sur la température de surface durant les mois d'hiver. Ils tendent par ailleurs à démontrer que la NAO pourrait également exercer une influence sur la température de surface durant les mois de transitions, au printemps et au début de l'hiver.

L'indice EA pourrait expliquer jusqu'à 25% de la variation de la température de surface dans le golfe (García-Soto et Pingree, 2012). Néanmoins, nous n'observons pas une telle influence dans le cadre de nos résultats (Figure 10, A et D).

Les eaux de surface du golfe de Gascogne se réchauffent globalement sous l'influence majeure de la NAO. Les valeurs estimées de ce réchauffement peuvent varier en fonction de la période étudiée, de la méthode d'analyse et des zones considérées (Costoya *et al.*, 2015). Un réchauffement des eaux de surface est observé pour tous les mois de l'année, sauf pour les mois d'été. Par ailleurs, on peut noter une proximité structurelle entre le patron SST-Nord Sud-Transition et la carte moyenne des températures de surface d'été. La tendance à un réchauffement des eaux durant tous les mois de l'année, à l'exception de ceux d'été, et la similitude entre le patron SST-Nord Sud-Transition et la carte moyenne des températures d'été tendent à démontrer que le golfe est caractérisé par des étés qui se rallongent, et pas par des étés plus intenses (Costoya *et al.*, 2015).

Au cours des dernières décennies, l'indice NAO a montré une tendance à la hausse qui a contribué pour moitié au réchauffement hivernal sur le continent Eurasien (Gillett *et al.*, 2003). Cette tendance positive n'est pas cohérente avec la variabilité naturelle connue de l'indice et serait liée à la concentration croissante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Gillett *et al.*, 2003). Le réchauffement des eaux de surface du golfe serait donc une conséquence du changement climatique induit par les activités humaines.

Les changements dans la dynamique saisonnière de la température observés au niveau du plateau continental et du quart Sud-Est du golfe pourraient avoir des implications sérieuses pour les écosystèmes marins locaux. Le décalage dans le réchauffement saisonnier détermine les réponses biotiques puisque la température peut influencer le cycle de vie des espèces marines (Selig *et al.*, 2010). Il serait donc possible que le réchauffement des eaux de surface entraîne des changements de biodiversité à l'échelle des écosystèmes et des populations (Gimenez, 2011). Les changements de température pourraient également impacter la biomasse phytoplanctonique. La température est un paramètre qui est effectivement connu pour jouer un rôle important dans la variation de la profondeur de la couche de mélange et donc dans la recharge des eaux de surface en nutriments (Somavilla *et al.*, 2009).

4.2 Évolution de la concentration en chlorophylle-a

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 (Figure 8, A et B). Entre 1999 et 2021, la biomasse de phytoplancton a ainsi baissé de $0,23 \mu g. L^{-1}$. En analysant 20 ans de données satellites entre 1998 et 2017, Gohin *et al.* (2019) ont montré, au contraire, qu'il n'y avait pas de changement significatif dans la concentration en chlorophylle-a dans le golfe de Gascogne.

Les flux d'azote et de phosphore, ainsi que l'indice AMO, expliquent environ 70% de la variance de l'amplitude associée au patron CHLA-Côte Large-Annuel (Figure 11, A). Cela indiquerait donc que le gradient côte-large de concentration en chlorophylle-a est sous l'influence majeure des apports en nutriments. L'AMO est un indice climatique qui est associé à des températures de surface de l'océan plus élevées que la moyenne en Atlantique Nord (Garcia-Soto et Pingree, 2012). Le fait que cet indice explique environ 20% de la variance de l'amplitude associée au patron CHLA-Côte Large-Annuel traduirait donc l'effet de la température sur la production primaire (Figure 11, A). La température de surface est effectivement un paramètre d'influence majeure sur la biomasse phytoplanctonique en modifiant, par exemple, la stratification verticale de la colonne d'eau et les échanges de nutriments entre les eaux de surfaces et les eaux plus profondes (He *et al.*, 2021). La tendance linéaire négative que nous observons entre l'AMO et l'indice CHLA-Côte Large-Annuel traduit bien l'influence négative qu'ont de fortes températures sur la concentration de chlorophylle-a en surface (He *et al.*, 2021). La baisse observée des flux de phosphore et le réchauffement des eaux de surface peuvent donc expliquer la diminution de la biomasse phytoplanctonique.

En hiver, on observe également une baisse de la concentration en chlorophylle-a au niveau des côtes françaises (Figure 8, C et D). Cette baisse est évaluée à $0,23 \mu g. L^{-1}$ entre 1999 et 2021. La turbulence induite par le vent et le débit des fleuves sont ici les variables explicatives principales qui représentent bien les conditions environnementales à cette saison (Figure 11, D). En hiver, le débit des fleuves et donc les apports en nutriments atteignent un pic (Borja *et al.*, 2019). Parallèlement à cela, les vents provoquent un mélange profond des eaux de surface et privent les cellules phytoplanctonique de leur accès à la lumière (Varela, 1996). La baisse constatée de la biomasse en phytoplancton durant l'hiver serait certainement liée à celle des flux de phosphore (Figure 11, C). Un déséquilibre dans les apports en azote et phosphore au

niveau de la zone côtière peut effectivement éloigner le rapport entre nutriments de celui de Redfield (Gohin *et al.*, 2019).

Concernant les mois d'été et de transition, aucune tendance significative n'a été observée entre 1999 et 2021 (Figure 7, L). Cela rejoint les conclusions de Gohin *et al.* (2019) qui n'ont pas observé de changement significatif le long des côtes situées au Sud de la Bretagne.

4.3 Liens entre les niveaux trophiques

Les longueurs à l'âge 1 des sardines et des anchois sont corrélées de façon significative avec la hausse des températures observées dans le quart Sud-Est du golfe durant les mois de transition. Cette zone et ces mois sont importants dans le cycle de vie des anchois et sardines, particulièrement pour la croissance des juvéniles (Figure 4, E et F). Les anchois pondent effectivement principalement dans le Sud-Est du golfe avec des zones de pontes situées au niveau de l'estuaire de la Gironde et au large de la côte des Landes (Bellier *et al.*, 2007 ; Motos *et al.*, 1996). La distribution spatiale des sardines est plus étendue que celles des anchois. Néanmoins, on retrouve des zones de pontes occasionnelles et récurrentes au Sud de l'estuaire de la Gironde (Bellier *et al.*, 2007). La dimension temporelle qui caractérise le patron de variation de la température (mai, octobre, novembre et décembre) correspond également à l'écologie de l'anchois et de la sardine dans le golfe de Gascogne. Les anchois se reproduisent entre mars et août avec une période intense entre mai et juin (Planque *et al.*, 2007). Les sardines se reproduisent quant à elle principalement durant le printemps, entre décembre et mars (Petitgas *et al.*, 2010). La croissance des juvéniles a donc lieu principalement en automne.

Le réchauffement des eaux de surfaces dans le quart Sud-Est du golfe de Gascogne peut expliquer en partie la réduction des longueurs aux âges 1 des sardines et des anchois. Chez les ectothermes, la hausse des températures provoque une augmentation du métabolisme, mais induit une baisse de la taille des individus adultes (Ohlberger, 2013). Costoya *et al.* (2015) avancent que la hausse de la température des eaux de surface du golfe pourrait aussi avoir des effets en cascade sur l'habitat des petits poissons pélagiques (hausse de la température, baisse du phytoplancton).

Le recrutement des sardines à l'âge 1 est corrélé de façon significative à la baisse de la biomasse phytoplanctonique au niveau du plateau continental durant l'hiver. Le régime alimentaire des sardines est majoritairement composé d'organismes zooplanctoniques, bien que du phytoplancton soit aussi consommé (Costalago *et al.*, 2015). Garrido *et al.* (2017) ont montré que la concentration en chlorophylle-a pouvait être utilisée pour prédire les années de forts et faibles recrutements dans les eaux Atlantico-Ibérienne. La relation linéaire négative entre le recrutement des sardines dans le golfe de Gascogne et l'indice de chlorophylle-a en hiver est donc difficilement interprétable à ce stade puisque le phytoplancton devrait influencer positivement le recrutement. De plus, l'indice n'est pas corrélé avec le recrutement de l'anchois et cette différence entre les espèces est aussi difficilement interprétable.

La mortalité par capture accidentelle des dauphins communs est corrélée négativement à la baisse de phytoplancton sur le plateau continental durant l'hiver (Figure 12, B). Les sardines et les anchois composent une part importante du régime alimentaire des dauphins communs dans le golfe de Gascogne (Meynier *et al.*, 2008). Ces deux espèces font également l'objet d'une pêche commerciale qui impacte la mortalité des mammifères marins dans la région (Lorance *et al.*, 2009).

Gilbert *et al.* (2021) ont montré, grâce à un travail de modélisation, que les variables océanographiques (température, turbulence, gradient horizontal de températures) exerçaient une influence conséquente sur le risque de capture accidentelle des dauphins communs dans le golfe de Gascogne en janvier, février et mars. Les fronts saisonniers en température situés au niveau du plateau continental pourraient effectivement être ciblées par les pêcheries et par les dauphins communs en tant que zone d'agrégation de petits poissons pélagiques, exposant les dauphins à un risque de capture accidentelle accrue. L'indice du patron CHLA-Plateau-Hiver traduit une baisse de phytoplancton des eaux au niveau du plateau continental en hiver. Cette baisse pourrait induire une période d'interaction croissante entre pêcheries et dauphins communs, ces derniers devant résider plus longtemps au niveau du plateau continental pour répondre à leurs besoins énergétiques.

Néanmoins, cette interprétation reste délicate. La mortalité des dauphins communs dans le golfe est affectée par de nombreux facteurs non-environnementaux tels que les caractéristiques des pêcheries (Gilbert *et al.*, 2021). La relation entre notre indice et la mortalité par capture est par ailleurs indirecte et ne doit donc pas être surinterprétée.

4.4 Limites

Pour pouvoir mettre à jour chaque année avec de nouvelles cartes satellites, les indices de chlorophylle-a et de température de surface, nous avons vérifié à l'aide d'une analyse canonique par correspondance que les EOFs calculés entre 1999 et 2020 et celles calculées entre 1999 et 2021 ne soient pas ou peu différentes. Aucune différence majeure n'a été relevée au niveau de la composition des groupes d'EOFs et des EOFs calculés sur les périodes 1999-2020 et 1999-2021 (Annexe 7 ; Annexe 8). Cette solution a été préférée à la détermination d'une période de référence qui nous aurait permis de projeter les années supplémentaires dans l'espace factoriel défini par les années de référence. Nous aurions pu définir cette période en nous appuyant sur les séries temporelles d'indices climatiques à l'image de Woillez *et al.* (2010) qui se sont basés sur l'indice EA. L'Organisation Météorologique Mondiale recommande qu'une période de 30 ans soit prise comme référence. Il est toutefois possible d'utiliser des périodes plus courtes de 10 à 12 ans (WMO, 2017). Dans une perspective de mise à jour annuelle des indices, il serait donc intéressant de définir une période continue de 10 ans sur la base d'un ou de plusieurs indices climatiques.

Les séries d'amplitudes se corrèlent mal aux variables liées aux niveaux trophiques supérieurs. Par ailleurs, les corrélations avec le recrutement des petits poissons pélagiques et la mortalité des dauphins sont difficilement interprétables. Il est par exemple surprenant d'avoir une corrélation significative entre le recrutement des sardines, mais pas avec celui des anchois dont l'écologie dans le golfe de Gascogne est très proche (Petitgas *et al.*, 2010). De même, la relation entre l'indice CHLA-Plateau-Hiver et la mortalité des dauphins communs est délicate à interpréter. Nos indices concernent des variables de bas niveaux trophiques alors que des effets relais induits par des variables intermédiaires, environnementales ou non, sont probablement à l'œuvre limitant donc les interprétations possibles.

La résolution spatiale et temporelle de l'étude limite les processus que l'on peut étudier. En optant pour des échelles spatiotemporelles plus fines, il serait peut être possible de mettre en évidence des processus océanographiques plus fugaces (sur plusieurs jours), tels que les upwellings, agissant à des échelles plus restreintes. Il deviendrait alors intéressant d'intégrer ces nouveaux indices à des modèles spatiotemporels tels que ceux développés par Gilbert *et*

al. (2021) pour étudier des phénomènes de cascades trophiques intenses ayant lieu sur des périodes plus courtes.

5. Conclusion et perspectives

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. Les indices issus des cartes satellite ont permis d'expliquer la diminution des tailles des anchois et des sardines. Mais les autres variables concernant les petits poissons pélagiques et les dauphins communs n'ont eu que des explications partielles, peut-être à cause d'effets relais non pris en compte dans nos corrélations. 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. Les indices environnementaux développés pourraient être valorisés en étant adjoint en tant que covariables à des modèles de distribution de petits poissons pélagiques. Enfin, dans le cadre du projet DELphinus MOuvements GESTion (DELMOGES), les indices pourraient être exploités dans la définition de carte des risques de capture accidentelle de dauphins.

Bibliographie

- Barnston, A.G., Livezey, R.E., 1987. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review* 115, 1083–1126. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2)
- Beaugrand, G., 2004. The North Sea regime shift: Evidence, causes, mechanisms and consequences. *Progress in Oceanography* 60, 245–262. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.018>
- Bellier, E., Planque, B., Petitgas, P., 2007. Historical fluctuations in spawning location of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in the Bay of Biscay during 1967–1973 and 2000–2004. *Fisheries Oceanogr* 16, 1–15. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00410.x>
- Bentamy, A., Prevost, C., Piollé, J.F., 2021. Global Ocean Wind L4 Reprocessed 6 hourly Observations. [WWW Document]. Mercator Ocean International. URL https://data.marine.copernicus.eu/product/WIND_GLO_PHY_L4_MY_012_006/description (accessed 5.24.23).
- Blessing, S., Fraedrich, K., Junge, M., Kunz, T., Lunkeit, F., 2005. Daily North-Atlantic Oscillation (NAO) index: Statistics and its stratospheric polar vortex dependence. *metz* 14, 763–769. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0085>
- Borja, A., Amouroux, D., Anschutz, P., Gómez-Gesteira, M., Uyarra, M.C., Valdés, L., 2019. The Bay of Biscay, in: *World Seas: An Environmental Evaluation*. Elsevier, pp. 113–152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00006-1>
- Chust, G., González, M., Fontán, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Cotano, U., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarmínaga, 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, Andrés, Esteban, X., Orue-Echevarria, D., Figueira, T., Uriarte, Adolfo, 2022. Climate regime shifts and biodiversity redistribution in the Bay of Biscay. *Science of The Total Environment* 803, 149622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149622>
- Conversi, A., Dakos, V., Gårdmark, A., Ling, S., Folke, C., Mumby, P.J., Greene, C., Edwards, M., Blenckner, T., Casini, M., Pershing, A., Möllmann, C., 2015. A holistic view of marine regime shifts. *Phil. Trans. R. Soc. B* 370, 20130279. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0279>
- Costalago, D., Garrido, S., Palomera, I., 2015. Comparison of the feeding apparatus and diet of European sardines *Sardina pilchardus* of Atlantic and Mediterranean waters: ecological implications. *J Fish Biol* 86, 1348–1362. <https://doi.org/10.1111/jfb.12645>
- Costoya, X., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Santos, F., 2015. Changes in sea surface temperature seasonality in the Bay of Biscay over the last decades (1982–2014). *Journal of Marine Systems* 150, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.06.002>
- Dorand, M., 2022. Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle a et de la température par Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) dans le golfe de Gascogn (Rapport de stage Master 2 mention Biodiversité, Écologie, Évolution, parcours Modélisation en écologie (MODE)). Ifremer.

- Doray, M., Boyra, G., van der Kooij, J., 2021. Manual for acoustic surveys coordinated under ICES Working Group on Acoustic and Egg Surveys for Small Pelagic Fish (WGACEGG) (No. 64), ICES Techniques in Marine Environmental Sciences. International Council for the Exploration of the Sea (ICES).
- Doray, M., Hervy, C., Huret, M., Petitgas, P., 2018. Spring habitats of small pelagic fish communities in the Bay of Biscay. *Progress in Oceanography* 166, 88–108. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.11.003>
- 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. Biol. Ass.* 92, 213–234. <https://doi.org/10.1017/S0025315410002134>
- Garrido, S., Silva, A., Marques, V., Figueiredo, I., Bryère, P., Mangin, A., Santos, A.M.P., 2017. Temperature and food-mediated variability of European Atlantic sardine recruitment. *Progress in Oceanography* 159, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.10.006>
- Gilbert, L., Rouby, E., Tew-Kaï, E., Spitz, J., Peltier, H., Quilfen, V., Authier, M., 2021. Spatiotemporal models highlight influence of oceanographic conditions on common dolphin bycatch risk in the Bay of Biscay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 679, 195–212. <https://doi.org/10.3354/meps13894>
- Gillett, N.P., Graf, H.F., Osborn, T.J., 2003. Climate change and the North Atlantic Oscillation, in: Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M. (Eds.), *Geophysical Monograph Series*. American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 193–209. <https://doi.org/10.1029/134GM09>
- Giménez, L., 2011. Exploring mechanisms linking temperature increase and larval phenology: The importance of variance effects. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 400, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.02.036>
- 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 Sci.* 7, 705–732. <https://doi.org/10.5194/os-7-705-2011>
- 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* 23, 1639–1661. <https://doi.org/10.1080/01431160110071879>
- Gohin, F., Van Der Zande, D., Tilstone, G., Eleveld, M.A., Lefebvre, A., Andrieux-Loyer, F., Blauw, A.N., Bryère, P., Devreker, D., Garnesson, P., Hernández Fariñas, T., Lamaury, Y., Lampert, L., Lavigne, H., Menet-Nedelec, F., Pardo, S., Saulquin, B., 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* 233, 111343. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111343>
- Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Alvarez, I., Gómez-Gesteira, J.L., 2008. Coastal sea surface temperature warming trend along the continental part of the Atlantic Arc (1985–2005). *J. Geophys. Res.* 113, C04010. <https://doi.org/10.1029/2007JC004315>
- Hamed, K.H., Ramachandra Rao, A., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204, 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)

- He, J., Christakos, G., Cazelles, B., Wu, J., Leng, J., 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, 102620. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102620>
- Hotelling, H., 1935. The most predictable criterion. *Journal of Educational Psychology* 26, 139–142. <https://doi.org/10.1037/h0058165>
- ICES, 2022. Working Group on Southern Horse Mackerel, Anchovy and Sardine (WGHANSA), ICES Scientific Reports. ICES Scientific Reports. <https://doi.org/10.17895/ICES.PUB.19982720>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., 2021. An introduction to statistical learning. Springer New York.
- Koutsikopoulos, C., Beillois, P., Leroy, C., Taillefer, F., 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. *Oceanologica Acta* 21, 335–344. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(98\)80020-0](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(98)80020-0)
- Kutzbach, J.E., 1967. Empirical Eigenvectors of Sea-Level Pressure, Surface Temperature and Precipitation Complexes over North America. *Cover Journal of Applied Meteorology and Climatology Journal of Applied Meteorology and Climatology* 6, 791–802. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006%3C0791:EEOSLP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006%3C0791:EEOSLP%3E2.0.CO;2)
- Lima, F.P., Wetthey, D.S., 2012. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nat Commun* 3, 704. <https://doi.org/10.1038/ncomms1713>
- Lorance, P., Bertrand, J.A., Brind'Amour, A., Rochet, M.-J., Trenkel, V.M., 2009. Assessment of impacts from human activities on ecosystem components in the Bay of Biscay in the early 1990s. *Aquat. Living Resour.* 22, 409–431. <https://doi.org/10.1051/alr/2009049>
- Mann, K.H., Lazier, J.R., 2005. Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans. John Wiley & Sons.
- Meynier, L., Pusineri, C., Spitz, J., Santos, M., Pierce, G., Ridoux, V., 2008. Intraspecific dietary variation in the short-beaked common dolphin *Delphinus delphis* in the Bay of Biscay: importance of fat fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 354, 277–287. <https://doi.org/10.3354/meps07246>
- Michel, S., Treguier, A.-M., Vandermeirsch, F., 2009. 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. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.11.019>
- Motos, L., Uriarte, A., Valencia, V., 1996. The spawning environment of the Bay of Biscay anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.). *Scientia Marina* 60, 117–140.
- Murtagh, F., Legendre, P., 2014. Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion? *J Classif* 31, 274–295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- Nally, R.M., 2000. Regression and model-building in conservation biology, biogeography and ecology: The distinction between – and reconciliation of – 'predictive' and 'explanatory' models. *Biodiversity and Conservation* 9, 655–671. <https://doi.org/10.1023/A:1008985925162>

- Ohlberger, J., 2013. Climate warming and ectotherm body size - from individual physiology to community ecology. *Funct Ecol* 27, 991–1001. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12098>
- OSPAR Commission (Ed.), 2000. Region 4: Bay of Biscay and Iberian Coast, Quality status report 2000 : region ... / OSPAR Commission for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic. London.
- Pearson, K., 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*.
<https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Peltier, H., Authier, M., Deaville, R., Dabin, W., Jepson, P.D., Van Canneyt, O., Daniel, P., Ridoux, V., 2016. Small cetacean bycatch as estimated from stranding schemes: The common dolphin case in the northeast Atlantic. *Environmental Science & Policy* 63, 7–18.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.004>
- 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. B* 370, 20130265.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0265>
- Petitgas, P., Alheit, J., Beare, D., Bernal, M., Casini, M., Clarke, M., Cotano, U., Dickey-Collas, M., Dransfeld, L., Harma, C., Heino, M., Massé, J., Möllmann, C., Silva, A., Skaret, G., Slotte, A., Stratoudakis, Y., Uriarte, A., Voss, R., 2010. Life-cycle spatial patterns of small pelagic fish in the Northeast Atlantic (No. 306), ICES Cooperative Research Report.
- Petitgas, P., Doray, M., Huret, M., Massé, J., Woillez, M., 2014. Modelling the variability in fish spatial distributions over time with empirical orthogonal functions: anchovy in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science* 71, 2379–2389.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu111>
- Planque, B., Bellier, E., Lazure, P., 2007. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Fisheries Oceanogr* 16, 16–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00411.x>
- 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>
- Selig, E.R., Casey, K.S., Bruno, J.F., 2010. New insights into global patterns of ocean temperature anomalies: implications for coral reef health and management: Global variability in temperature anomalies on coral reefs. *Global Ecology and Biogeography* 19, 397–411.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00522.x>
- Somavilla, R., González-Pola, C., Rodríguez, C., Josey, S.A., Sánchez, R.F., Lavín, A., 2009. Large changes in the hydrographic structure of the Bay of Biscay after the extreme mixing of winter 2005. *J. Geophys. Res.* 114, C01001. <https://doi.org/10.1029/2008JC004974>
- Storch, H. von, Zwiers, F.W., 1984. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge Core.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511612336>
- Varela, M., 1996. Phytoplankton ecology in the Bay of Biscay. *Scientia Marina* 60, 45–53.

WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (No. 1203), 2017. . World Meteorological Organization (WMO).

Woillez, 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. *Progress in Oceanography* 87, 83–93.

<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.009>

Annexes

Annexe 1. Variance expliquées (en %) par les cinq premières EOFs de chaque mois pour les données satellites de température.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	87.78	76.85	78.7	89.61	87.32	85.22	86.05	84.13	75.12	77.45	85.57	87.93
EOF2	3.77	7.83	6.4	4.78	5.86	9.26	8.8	8.83	12.81	12.4	7.42	6.76
EOF3	2.75	5.61	5.79	1.97	2.41	1.91	2	3.29	5.55	4.91	3.94	1.97
EOF4	1.46	2.94	2.48	0.81	1.32	1.08	0.92	1.02	1.52	1.06	0.73	0.72
EOF5	0.9	1.3	1.62	0.58	0.76	0.6	0.56	0.56	0.91	0.87	0.48	0.62

Annexe 2. Variance expliquées (en %) par les cinq premières EOFs de chaque mois pour les données satellites de concentrations en chlorophylle-a.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EOF1	8.27	30.6	38.51	27.89	40.28	42	55.98	54.66	49.64	51.3	43.37	41.08
EOF2	15.59	17.65	14.15	18.02	14.62	21.62	13.86	15.25	22.63	11.77	17.79	18.29
EOF3	10.3	11.25	10.41	9.74	13.27	10.13	7.94	9.84	7.65	10.14	11.13	12.38
EOF4	5.79	8.04	7.69	9.36	6.8	5.36	5.59	4.75	6.05	7.93	5.98	8.57
EOF5	4.19	6.91	5.93	7.04	6.32	5.09	4.29	3.72	3.38	4.37	4.43	5.46

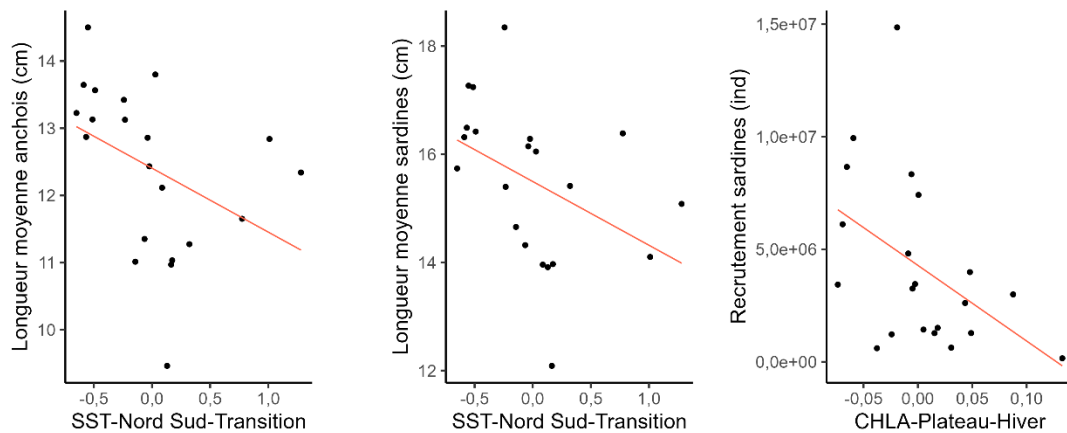
Annexe 3. Variance expliquée (r^2) par les modèles de régressions linéaires multiples entre les indices des patrons spatiaux et les variables forçantes et significativité (p) des relations.

	CHLA-Côte Large-Annuel	CHLA-Plateau-Hiver	SST-Côte Large-Hiver	SST-Nord Sud-Transition
r^2	0,79	0,29	0,53	0,36
p	0,03	0,62	0,12	0,43

Annexe 4. Coefficient de détermination entre les variables liées aux petits poissons pélagiques et les indices des patrons spatiaux. Les coefficients en gras ont une $p < 0,05$.

	CHLA-Côte Large-Annuel	CHLA-Plateau-Hiver	CHLA-Sud Bretagne-Transition	SST-Côte Large-Hiver	SST-Nord Sud-Transition	SST-Homogène-Été
Taille anchois	0,24	0,38	-0,07	-0,16	-0,63	-0,18
Taille sardines	0,15	0,34	-0,24	-0,14	-0,57	-0,14
Recrutement anchois	-0,12	-0,13	-0,08	0,28	0,40	-0,22
Recrutement sardines	-0,19	-0,48	0,30	-0,06	0,34	-0,10

Annexe 5. Relations significatives entre les indices des patrons spatiaux et les paramètres liés aux niveaux trophiques supérieurs. A représente la longueur moyenne à l'âge 1 des anchois (en cm) en fonction de l'indice du patron SST-Nord Sud-Transition. B représente la longueur moyenne à l'âge 1 des sardines (en cm) en fonction de l'indice du patron SST-Nord Sud-Transition. C représente le recrutement à l'âge 1 des sardines (en nombre d'individus) en fonction de l'indice du patron CHLA-Plateau-Hiver. La ligne rouge indique que la pente de régression linéaire (Mann-Kendal) significative.



Annexe 6. Coefficients de détermination (r^2) et leur significativité (p) entre la mortalité des dauphins et les indices des patrons spatiaux.

	CHLA-Côte Large-Annuel	CHLA-Plateau-Hiver	CHLA-Sud Bretagne-Transition	SST-Côte Large-Hiver	SST-Nord Sud-Transition	SST-Homogène-Été
r^2	-0,39	-0,87	-0,36	0,32	0,19	0,10
p	0,21	0,0003	0,26	0,31	0,54	0,77

Annexe 7. Corrélation (en %) entre chaque paire de covariables canoniques pour les EOFs calculés à partir des données satellites de température de surface.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% cor	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96

Annexe 8. Corrélation (en %) entre chaque paire de covariables canoniques pour les EOFs calculés à partir des données satellites de concentration en chlorophylle-a.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
% cor	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,95	0,93	0,91	0,73

Résumé

Ozanam, B., 2023. Indices d'environnements marins et corrélations avec les niveaux trophiques supérieurs 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

Abstract

Ozanam, B., 2023. Environmental indices and correlations with higher trophic levels in the Bay of Biscay

EOF analysis has been used since longtime in meteorology and physical oceanography to decompose the space-time variability of a map series. Besides that, satellite maps of sea surface temperature and chlorophyll-a are supplied every day for more than 20 years. EOF analysis has been applied on those data. The use of EOF analysis and the grouping of the computed EOF shows spatial modes of variability which are each linked to an amplitudes series that have been quantified. The construction of multiple linear models with environmental variable and the variance partitioning have been able to explain the variability of the quantified amplitudes series. Then, those series have been valorized by correlating them to high trophic level variables. Our results show that sea surface temperature is rising in winter along the French coast, and in spring and autumn in the South-East part of the Bay under the influence of the NAO index. At the same time, the annual and winter coastal gradients of phytoplankton biomass is decreasing under the influence of nutrients and of the vertical structure of the water column. Index series that have been developed explain some high trophic level variables. However, bridging effect of intermediate variables aren't considered which puts our interpretations into perspective.

Keywords: Bay of Biscay; Sea Surface Temperature; Chlorophyll-a; Empirical Orthogonal Functions; Environmental Indices