

Université de Rennes 1

Rapport de stage Master 2 mention Biodiversité, Écologie,
Évolution, parcours Modélisation en écologie (MODE)

Indices de variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle *a* et de la température par Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) dans le golfe de Gascogne

Réalisé par : Marine Dorand

Date : Du 03/01/2022 au 01/07/2022

Maitre de stage et co-encadrants : Antoine Huguet, Pierre Petitgas et Mathieu Doray

Référant universitaire : Cédric Wolf

Structure d'accueil : IFREMER

Adresse : 44311 Cedex 03, Rue de l'Île d'Yeu, 44980 Nantes

Soutenu : 21/06/2022

Remerciements

Je tiens à remercier Mrs Antoine Huguet, Pierre Petitgas et Mathieu Doray pour leurs accompagnements, leurs conseils et leur soutien tout au long du stage.

Je remercie aussi toute l'équipe VIGIES au sein d'IFREMER pour leur accueil, leur bonne humeur et leur pause-café.

Je tiens à remercier les enseignants de ma formation universitaire, qui m'ont transmis les connaissances nécessaires afin d'effectuer ce stage.

Sommaire

| | |
|--|----|
| I Introduction..... | 4 |
| II Données et Méthodes..... | 5 |
| 1 Zone d'étude..... | 5 |
| 2 Images satellites | 6 |
| 3 Création d'indices environnementaux..... | 6 |
| 3.1 Analyse en composante principale : EOF (Fonctions Orthogonales Empiriques) | 6 |
| 3.2 Classification des EOFs..... | 8 |
| 3.3 Indices et patrons spatiaux..... | 9 |
| 4 Les variables environnementales explicatives..... | 10 |
| 5 Taille-aux-âges | 11 |
| 6 Résolution spatiale et temporelle différentes des cartes satellites | 11 |
| III Résultats | 11 |
| 1 Température..... | 11 |
| 1.1 Évolution saisonnière moyenne..... | 11 |
| 1.2 Analyse en composantes principales | 14 |
| 2 Chlorophylle <i>a</i> | 17 |
| 2.1 Évolution saisonnière moyenne..... | 17 |
| 2.2 Analyse en composante principale EOF..... | 20 |
| III Discussion | 24 |
| 1 Température..... | 24 |
| 1.1 Evolution saisonnière | 24 |
| 1.2 Variabilité de la température | 25 |
| 2 Chlorophylle <i>a</i> | 26 |
| 2.1 Evolution saisonnière | 26 |
| 2.2 Variabilité..... | 27 |
| 3 Limites de l'analyse..... | 28 |
| IV Conclusion..... | 30 |
| V Bibliographie | 31 |

I 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*.

II Données et Méthodes

1 Zone d'étude

La zone d'étude est le golfe de Gascogne défini en longitude de 5° à 0°W et en latitude de 43° à 48°N. Les données journalières de température et de chlorophylle *a* de 1999 à 2020 sont moyennées en mailles de 0,25° en longitude par 0,25° en latitude. La valeur de la maille est la moyenne arithmétique des données à l'intérieur du carré qui a pour coordonnées le centre du carré (Figure 1). Les cartes journalières sont moyennées pour obtenir une carte moyenne mensuelle pour chaque année. Puis, les cartes moyennes mensuelles de température et de chlorophylle *a* de 1999 à 2020 sont obtenues par une moyenne des cartes mensuelles de chaque année de 1999 à 2020.

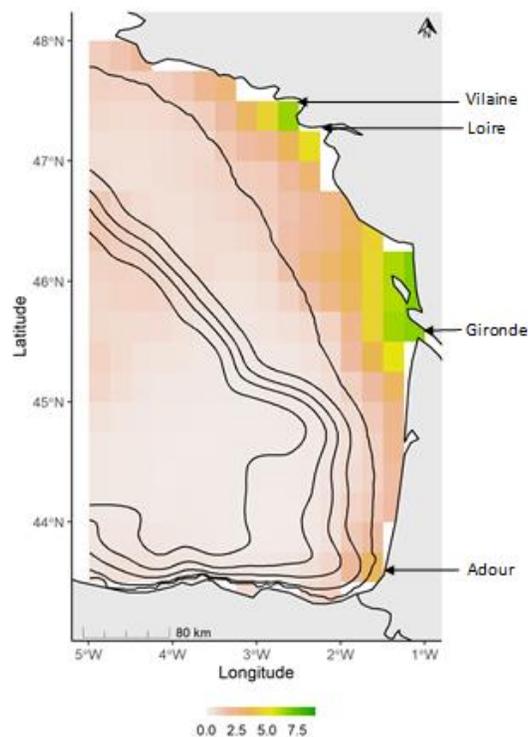


Figure 1 : La carte moyenne de la concentration de chlorophylle *a* (en µg/L) en mai dans le golfe de Gascogne en 2000, avec les embouchures de 4 fleuves dans le golfe de Gascogne. Les lignes noires correspondent aux isobathes tous les 100m de profondeur.

2 Images satellites

Les données satellites journalières de température proviennent des capteurs AVHRR des satellites de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Les images nocturnes journalières ont été interpolées par krigeage (Saulquin and Gohin, 2010). Les données satellites de la chlorophylle *a* proviennent des différents capteurs SeaWiFS, MERIS, MODIS. La transformation de la donnée brute en concentration de chlorophylle *a* est faite par l'algorithme OC5(Gohin *et al.*, 2002) et interpolée selon le processus décrit par Gohin (2011). La chlorophylle est le pigment qui permet la photosynthèse. Sa concentration est un indice de biomasse du phytoplancton.

3 Création d'indices environnementaux

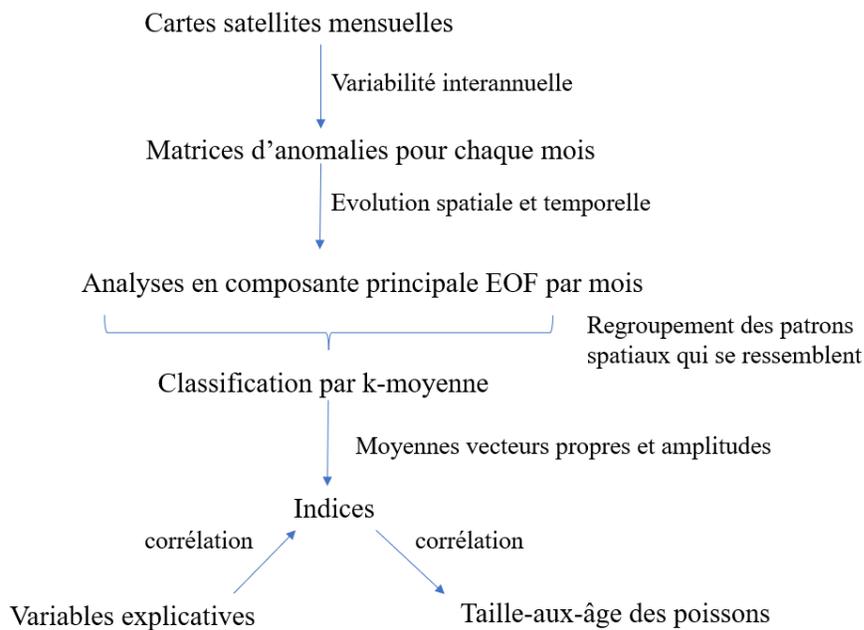


Figure 2 : Schéma récapitulatif de la création d'indices de la variabilité d'environnement marin : température et chlorophylle *a*

3.1 Analyse en composante principale : EOF (Fonctions Orthogonales Empiriques)

La méthode des EOF (Fonctions Orthogonales Empiriques), est une décomposition orthogonale aux valeurs propres qui permet de décomposer la variabilité temporelle sur une grille

spatiale pour obtenir des patterns temporels et spatiaux (Pearson, 1901; Hotelling, 1935; Storch and Zwiers, 1984) ([Figure 2](#)).

3.1.1 Matrice d'anomalies

Une matrice Z est construite par rapport aux données dans l'espace et dans le temps. La matrice $Z(t,s)$ a donc t lignes allant de 1 à N temps et s colonnes allant de 1 à K , avec s correspondant aux coordonnées:

$$Z(t,s) = \begin{matrix} & \xrightarrow{s} \\ t \downarrow & \begin{pmatrix} 1,1 & \cdots & 1,K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N,1 & \cdots & N,K \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$Z(t,s)$ est une matrice contenant les cartes maillées sous forme de vecteurs de lignes avec un ordre spatial similaire. Une matrice d'anomalie $X(t,s)$ est calculée en soustrayant à la matrice $Z(t,s)$ la moyenne temporelle $\bar{Z}(\cdot, s)$ pour chaque cellule:

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

Cela signifie que chaque cellule de la matrice d'anomalie $X(t,s)$ est une variation au temps t par rapport à la moyenne, à la localisation s . L'analyse en composante principale se fait sur cette matrice X ([Figure 1](#)).

3.1.2 Fonctions Orthogonales Empiriques

L'analyse EOF permet une factorisation linéaire des composantes spatiales (Vecteurs propres, patron spatial) qui sont constantes dans le temps et des amplitudes (Composantes principales) qui sont variables dans le temps (Kutzbach, 1967; Petitgas *et al.*, 2014) telle que :

$$Z(t,s) = \bar{Z}(\cdot, s) + \sum_{m=1}^q U_m(t) E_m^T(s), \quad (3)$$

Avec $E_m(s)$ les vecteurs propres ou EOF (modes principaux) normés à 1, $U_m(t)$ les amplitudes des EOF normées aux valeurs propres, et q le nombre de valeurs propres de l'analyse EOF. Grâce aux vecteurs propres orthogonaux on peut maximiser la variance spatiale à travers le temps et obtenir des coefficients de variation dans le temps sur une localisation précise. La variance locale d'un

mode spécifique m (ce qui est équivalent à une EOF d'ordre m) est la proportion de la variance à travers le temps expliquée à une localisation précise par rapport à la variabilité globale de cette localisation (Petitgas *et al.*, 2014). On obtient une carte de la variabilité locale par EOF qui permet de déceler les localisations qui participent le plus au patron (EOF) d'ordre m :

$$\eta_m(s) = \frac{\text{Var}[Y_m](s)}{\sum_m \text{Var}[Y_m](s)}, \quad (4)$$

Avec $Y_m = U_m(t)E_m^T(s)$

3.2 Classification des EOFs

Pour classer et regrouper les EOFs qui se ressemblent (le signe des vecteurs propres étant arbitraire), nous avons homogénéisé les cartes des EOFs en imposant que chacune soit positive à une localisation précise ($-2,625^\circ$ en longitude et $47,375^\circ$ en latitude), qui correspond à l'embouchure de la Vilaine. Une comparaison et un regroupement est possible après cette standardisation. Une EOF est effectuée par mois ([Figure 2](#)). Pour un seul mois, plusieurs EOFs (patrons spatiaux avec leurs amplitudes), avec chacune une carte de variance expliquée, sont obtenues. Toutes les EOFs (vecteurs propres) expliquent la variabilité autour du patron moyen mensuel de 1999 à 2020. D'après Barnston et Livezey (1987), pour faire des indices climatiques, il faut regrouper les patrons spatiaux qui se ressemblent, et qui ne sont pas forcément du même ordre m .

3.2.1 Seuils

Nous avons choisi de définir un seuil pour sélectionner les EOFs expliquant une variance acceptable autour du patron moyen. Toutes les EOFs avec une valeur propre, qui explique au minimum 15% de la variance, sont sélectionnées.

3.2.2 classification ascendante hiérarchique

L'objectif est d'identifier le nombre de groupes de patrons spatiaux similaires dans les EOFs sélectionnées ([Figure 2](#)). Une classification ascendante hiérarchique est effectuée après une Analyse en Composante Principale (ACP) sur les EOFs. L'analyse se fait sur une matrice contenant

les EOFs en colonnes et les stations en lignes (package “ade4” sur R). Le nombre d’axes choisis correspond aux valeurs propres supérieures à 1, d’après Kaiser en (1991). Pour la classification ascendante hiérarchique, la mesure d’éloignement (matrice de distance) est calculée selon les distances euclidiennes dans l’espace factoriel de l’ACP et la stratégie d’agrégation est effectuée selon le critère Ward D2 (Murtagh and Legendre, 2014). Le choix du nombre de groupes est arbitraire mais cohérent avec une coupure lors d’un saut important de la hauteur par inspection visuelle de l’arbre.

3.2.3 k-moyennes

Le partitionnement des différentes EOF se fait par la méthode k-moyennes (MacQueen, 1967) en imposant le nombre de groupes identifiés avec la classification ascendante hiérarchique réalisée précédemment. Le regroupement se fait par l’algorithme de Hartigan et Wong (1979).

3.3 Indices et patrons spatiaux

En rassemblant les EOFs similaires, par groupe on calcule :

- Une variance expliquée moyenne de toutes les variances expliquées des EOFs qui appartiennent à G_i . G_i correspond au groupe d’indice i des EOFs, classifiées par k-moyennes. Il regroupe les variances, vecteurs propres, les amplitudes et variances locales d’EOFs de différents ordres et de différents mois, selon le résultat de la classification. Soit :

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

N_i correspond au nombre d’EOFs dans le groupe G_i .

- Un patron spatial moyen de variabilité qui correspond à la moyenne des vecteurs propres (de chaque cellule spatiale s) qui appartiennent à G_i soit :

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

- Une variance locale moyenne, qui correspond à la moyenne des variances locales (de chaque cellule spatiale) qui appartiennent à G_i , soit :

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

- Une amplitude moyenne par an associée au patron spatial moyen de variabilité. $U_i(k)$, l'indice du groupe i pour une année k , est calculé en faisant la moyenne des amplitudes sur tous les mois j (1 à 12) (équation 8). Si plusieurs EOFs d'ordres différents pour un même mois sont dans le même groupe i , l'amplitude U du mois correspond à la somme des amplitudes des EOFs. Les mois n'ayant aucune EOF associée dans le groupe i ont des amplitudes nulles.

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

$d_i=1$ si l' EOF $\in G_i$ ou $d_i=0$ sinon. Pour un groupe qui contient peu d'EOFs, les valeurs d' $U_i(k)$ sont faibles car la moyenne contient beaucoup de zéros.

La tendance linéaire des amplitudes (série temporelle) de chaque groupe est testée par le test de Mann-Kendall corrigé par Hamed et Rao (1998). Comme le suggèrent Rao *et al.* (2003), seuls les trois premiers coefficients d'autocorrélation sont utilisés dans cette analyse (package "modifiedmk" sur R).

4 Les variables environnementales explicatives

Le débit de la Loire moyen par mois a été calculé en moyennant les débits moyens journaliers (m³/s) de 1998 à 2019. Les indices climatologiques mensuels comprennent : l'indice de l'oscillation nord atlantique (North Atlantic Oscillation, NAO, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>), le pattern Atlantique Est (East Atlantic, EA, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>) et le pattern scandinave (The Scandinavia pattern, SCAND, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml>). La vitesse des vents en m/s provient des modèles d'après Bentamy et Prevost (2021), sur le point géographique (45,5°N, 2,25°W). La somme de la vitesse pour une direction (nord-est, sud-est, sud-ouest, nord-ouest) par mois est calculée.

Pour mesurer le lien entre les amplitudes annuelles moyennes et des variables environnementales ([Figure 2](#)), un test de corrélation de Spearman est réalisé (Hollander and Wolfe,

1973; Best and Roberts, 1975). Seulement les mois sélectionnés des groupes d'EOFs (G_i) sont pris en compte pour le calcul d'une moyenne annuelle des variables environnementales associée au groupe G_i . Les amplitudes annuelles des différents groupes G_i sont corrélées aux variables environnementales associés au groupe G_i à l'échelle annuelle.

5 Taille-aux-âges

Pour mesurer le lien entre les amplitudes associées aux patrons spatiaux et des changements de taille-aux-âges chez les sardines ([Figure 2](#)), un test de corrélation de Spearman est réalisé. La longueur (en cm) moyenne à l'âge 1, 2, 3, 4, 5 et 6 est une moyenne pondérée, calculée d'après les données des campagnes à la mer PELGAS (Doray *et al.*, 2018), effectuées par IFREMER. La longueur des poissons est pondérée par leur abondance par classe de taille. Les amplitudes annuelles des différents groupes G_i sont corrélées aux tailles-aux-âges des sardines.

6 Résolution spatiale et temporelle différentes des cartes satellites

L'analyse par EOF et la classification des EOFs sur les cartes satellites mensuelles, ont été aussi réalisées avec des résolutions spatiales et temporelles différentes pour apprécier la robustesse de l'approche vis-à-vis de la résolution avec laquelle les cartes sont produites. Deux résolutions ont été considérées :

- Une résolution temporelle de 15j et une résolution spatiale de $0,10^\circ$ (longitude et latitude)
- Une résolution temporelle de 3 mois et une résolution spatiale de $0,25^\circ$ (longitude et latitude)

III Résultats

1 Température

1.1 Évolution saisonnière moyenne

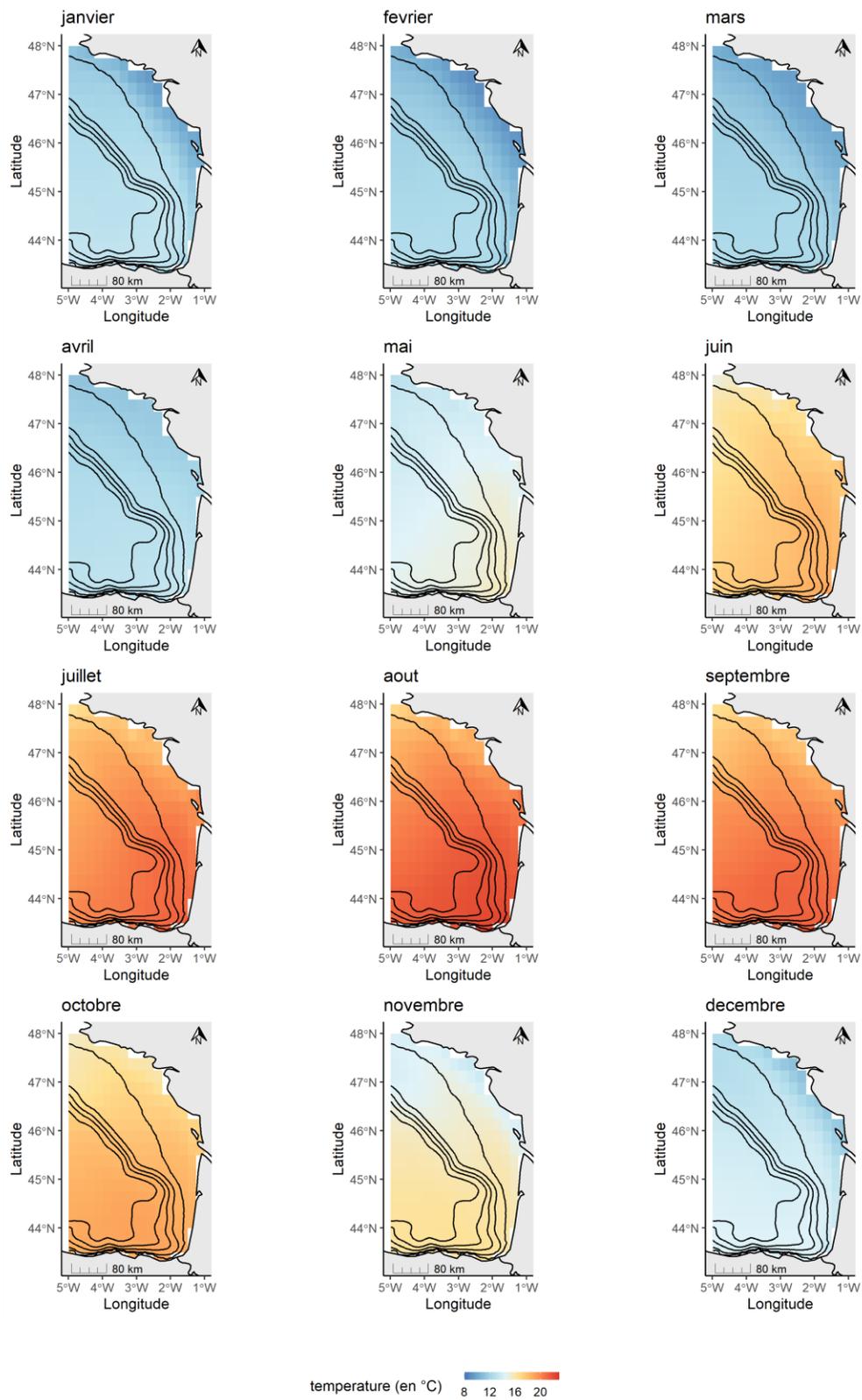


Figure 3 : Cartes mensuelles moyennes de température dans le golfe de Gascogne de 1999 à 2020. Les lignes noires correspondent aux isobathes tous les 100m de profondeur.

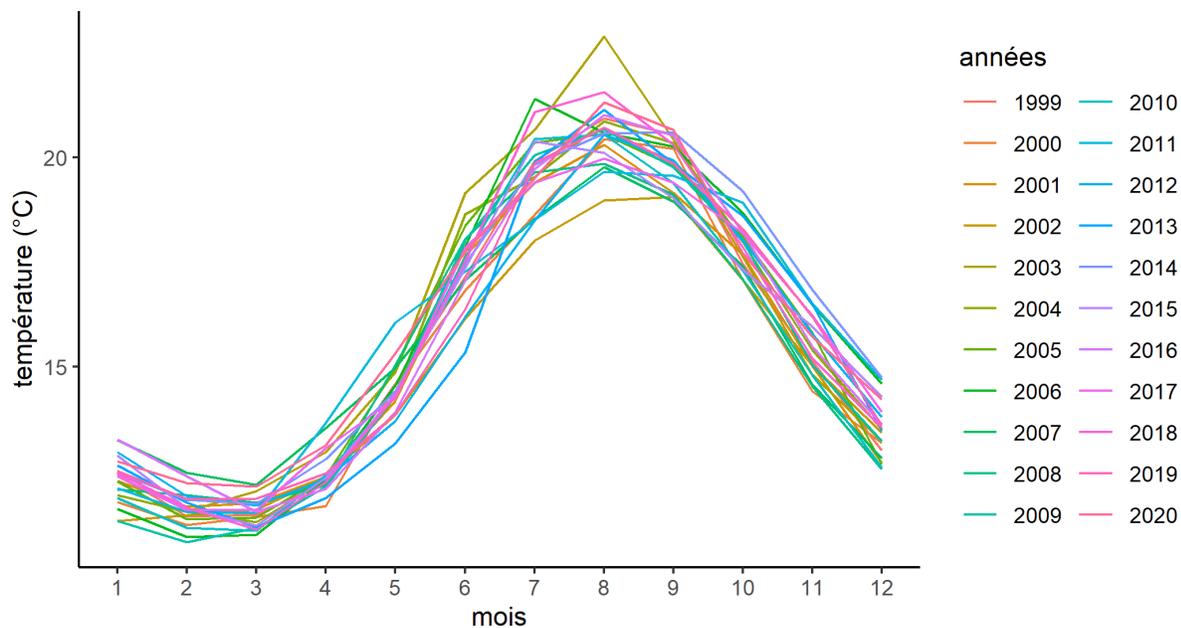


Figure 4 : Moyennes mensuelles de la température dans le golfe de Gascogne selon les années de 1999 à 2020.

L'évolution saisonnière de la température dans le golfe de Gascogne est homogène d'une année à une autre ([Figure 4](#)). La température est faible en hiver et se réchauffe en mai pour atteindre un pic en août. Les cartes moyennes mensuelles ([Figure 3](#)) montrent un gradient plus froid à la côte et plus chaud au large pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février, mars). En avril, la température est homogène dans le golfe. A partir de mai, les eaux de surfaces sont plus chaudes au Sud qu'au Nord jusqu'en octobre. En novembre, la température est à nouveau homogène dans le golfe et plus chaud qu'en avril avant de repasser à la situation d'hiver.

1.2 Analyse en composantes principales

Tableau 1 : Variances expliquées des 5 premières EOFs (à partir des données satellites de température) en pourcentage par mois.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| EOF 1 | 87,95 | 76,12 | 78,16 | 90,03 | 86,86 | 86,59 | 87,04 | 84,37 | 75,72 | 77,46 | 85,71 | 88,5 |
| EOF 2 | 3,88 | 8,17 | 6,62 | 4,53 | 6,06 | 8,1 | 7,78 | 8,65 | 13,19 | 12,23 | 7,06 | 6,28 |
| EOF 3 | 2,28 | 5,73 | 5,96 | 1,95 | 2,49 | 1,8 | 1,92 | 3,14 | 4,92 | 4,96 | 4,07 | 1,93 |
| EOF 4 | 1,41 | 2,99 | 2,57 | 0,81 | 1,36 | 0,98 | 0,96 | 1,02 | 1,1 | 1,08 | 0,76 | 0,75 |
| EOF 5 | 0,93 | 1,34 | 1,5 | 0,51 | 0,81 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 0,91 | 0,89 | 0,5 | 0,53 |

Quel que soit le mois, la première EOF explique, à elle seule, largement plus de 15% de variance expliquée ([Tableau 1](#)).

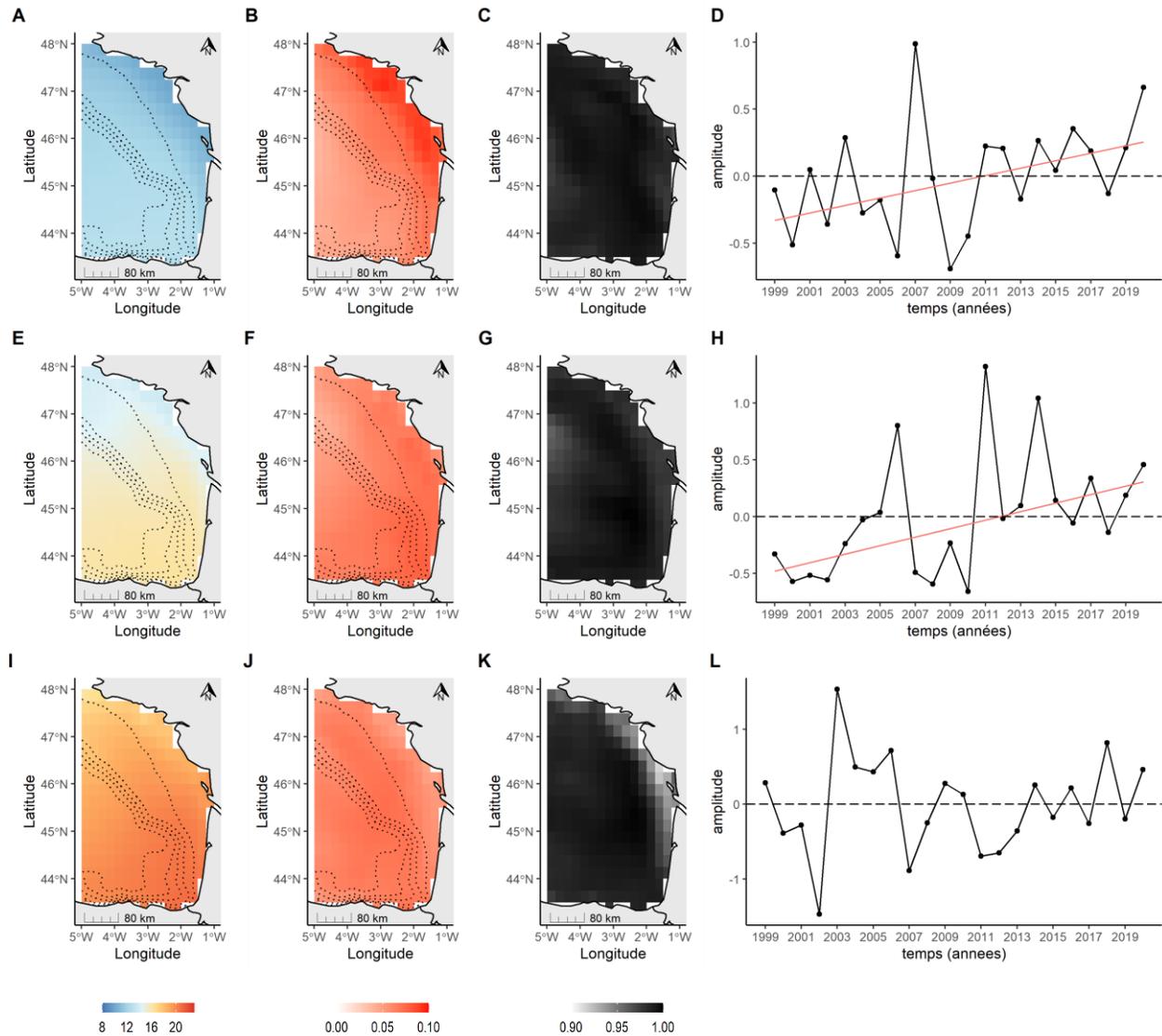


Figure 5 : Les trois patrons spatiaux de variabilité de la température dans le golfe de Gascogne, obtenus par analyse EOF et par regroupement des EOFs par k-moyennes. A, B, C, D illustrent le premier groupe qui explique en moyenne 83 % de la variance autour du patron moyen mensuel, E, F, G, H illustrent le deuxième groupe qui expliquent en moyenne 84,6 % de la variance et I, J, K, L le troisième groupe qui explique en moyenne 83,4% de la variance. La première colonne montre les patrons moyens de la température de surface (en °C) correspondant à la moyenne des mois sélectionnés dans le groupe. La deuxième colonne montre les patrons spatiaux de variabilité (moyenne des EOFs par groupe). Les lignes en pointillés représentent les isobathes tous les 100m de sonde. La troisième colonne montre les cartes de variances locales moyennes par groupe. Le continent est représenté en gris. La quatrième colonne montre les séries temporelles des amplitudes moyennes par groupe. La ligne rouge représente la pente de la tendance (Mann-Kendall) quand elle est significative.

1.2.1 Premier groupe

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Le premier groupe est composé des EOF1 des mois de janvier, février, mars et avril ([Tableau 2](#)). Le premier groupe a un patron spatial moyen avec une gradient côte/large, où la côte est plus froide que le large ([Figure 5, A](#)). Le premier patron spatial moyen de variabilité est positif

Tableau 2 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyennes pour le premier groupe. 1 signifie la présence de ce mois et cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

sur l'ensemble du golfe avec des valeurs plus importantes au niveau de la côte ([Figure 5, A](#)). La variance locale moyenne du groupe est importante sur l'ensemble du golfe ([Figure 5, C](#)). L'amplitude moyenne du groupe a une tendance linéaire significativement positive à un seuil d'erreur de 1^{ère} espèce de 0,1 (Mann Kendall, P= 0,055) de pente 0,028 ([Figure 5, D](#)).

1.2.2 Deuxième groupe

Tableau 3 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyennes pour le second groupe. 1 signifie la présence de ce mois et cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Le deuxième groupe est composé des EOF1 des mois de mai, octobre, novembre et décembre ([Tableau 3](#)). Le deuxième groupe a un patron spatial moyen homogène dans le golfe ([Figure 5, E](#)). Le patron spatial moyen de variabilité est positif dans tout le golfe de Gascogne, avec des valeurs plus importantes dans le Sud Est ([Figure 5, F](#)). La variance locale moyenne est importante sur l'ensemble du golfe ([Figure 5, G](#)). L'amplitude moyenne associée au patron spatial de variabilité a une tendance linéaire significativement positive au seuil de 1^{ère} espèce de 0,05 (Mann Kendall, P= 0,009) de pente de 0,04 ([Figure 5, H](#)). L'amplitude de ce deuxième groupe est

positivement corrélée aux vents de Nord-Ouest (Spearman, $P=0,019$) avec un coefficient de 0,50. Les taille-aux-âges des sardines d'âge 1 et 2 est négativement corrélée à l'amplitude de ce deuxième groupe (Spearman, $P=0,009$, $P= 0,023$ respectivement) avec un coefficient de -0,58 et -0,51. La taille-aux-âges des sardines diminue avec l'augmentation de température au Sud et à la côte.

1.2.3 Troisième groupe

Tableau 4 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyennes pour le troisième groupe. 1 signifie la présence de ce mois et de cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Le troisième groupe est composé des EOF1 des mois de juin, juillet, août et septembre ([Tableau 4](#)). Le troisième groupe a un patron spatial moyen avec un gradient nord/sud, où le nord est plus froid que le sud ([Figure 5](#), I). Le patron spatial moyen de variabilité est positif dans l'ensemble du golfe de Gascogne ([Figure 5](#), J). Le patron moyen de variabilité montre également des valeurs plus faibles le long de la côte. La variance locale moyenne est plus faible le long de la côte française ([Figure 5](#), J). L'amplitude moyenne associée au patron spatial n'a pas de tendance (Mann Kendall, $P= 0,73$)

2 Chlorophylle *a*

2.1 Évolution saisonnière moyenne

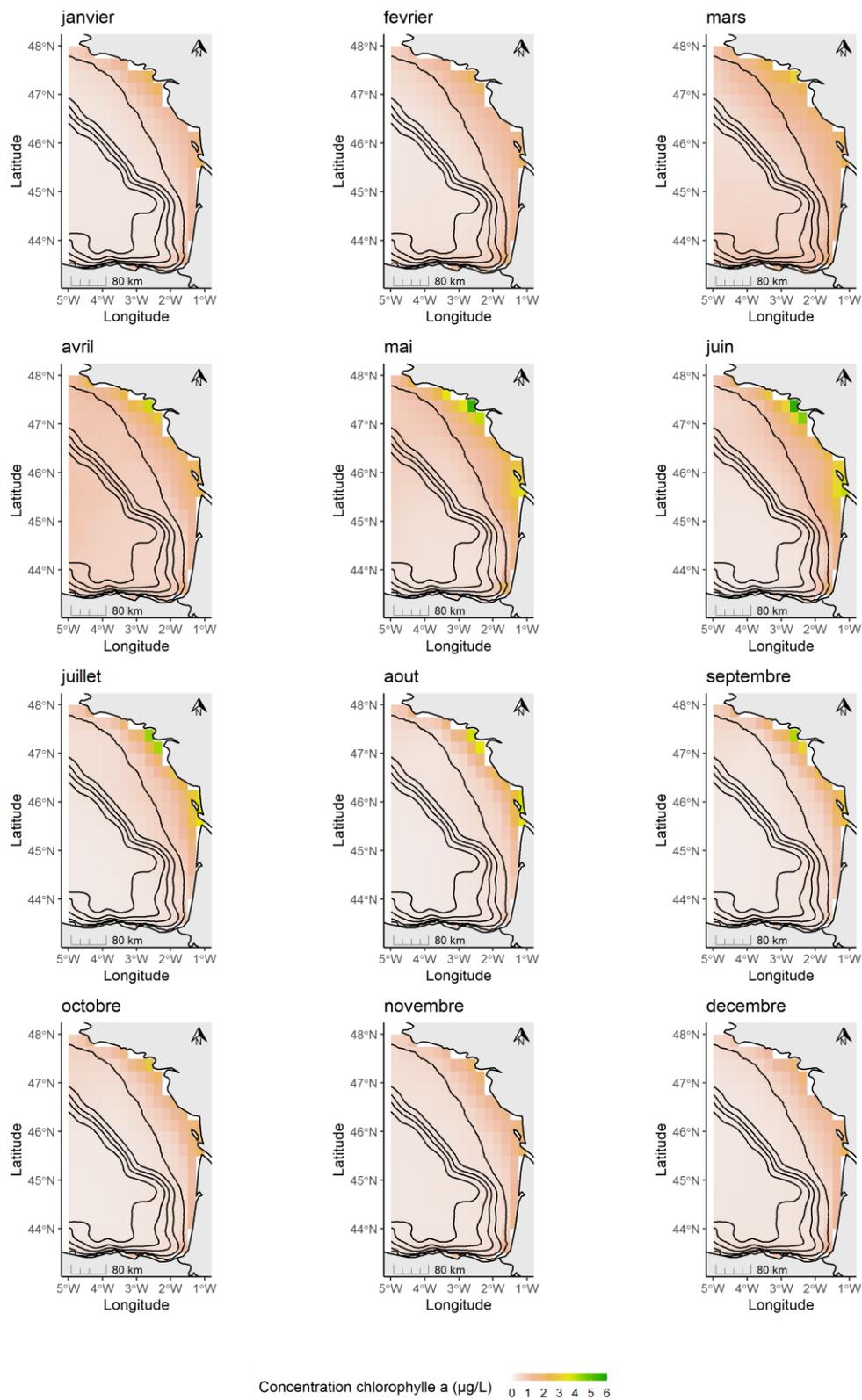


Figure 6 : Cartes mensuelles moyennes de la concentration en chlorophylle *a* dans le golfe de Gascogne de 1999 à 2020. Les lignes noires correspondent aux isobathes tous les 100m de profondeur.

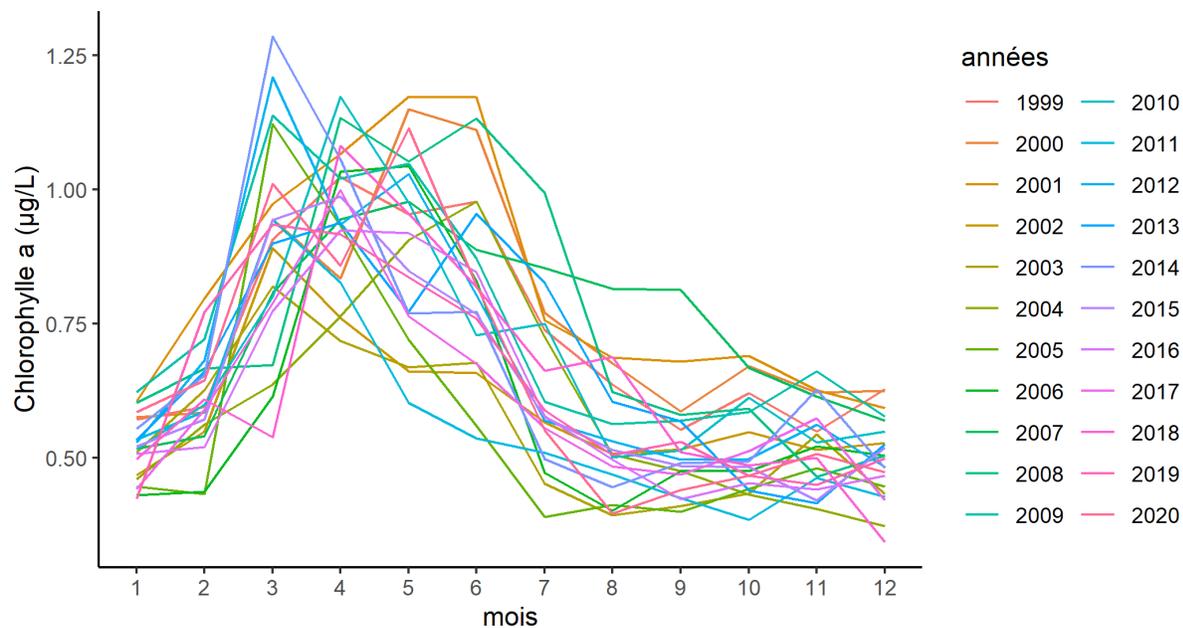


Figure 7 : Moyennes mensuelles de concentration en chlorophylle *a* dans le golfe de Gascogne selon les années de 1999 à 2020.

L'évolution saisonnière de la concentration en chlorophylle *a* dans le golfe de Gascogne est variable d'une année à une autre (Figure 7). Les pics de production se répartissent entre mars et juin avec pour certaines années 2 pics de production. Les mois d'octobre à janvier sont très peu productifs. Les cartes de moyennes mensuelles montrent également des mois moins productifs entre octobre et mars et des mois très productifs entre mai et juin. Les cartes moyennes mensuelles de la concentration en chlorophylle *a* sont similaires quel que soit le mois (Figure 6). Elles montrent toutes un gradient côte-large. La concentration est plus forte à la côte et plus faible au large sur le plateau. Ce gradient s'accroît pendant les mois les plus productifs, avec beaucoup de biomasse près des estuaires de la Loire et de la Vilaine.

2.2 Analyse en composante principale EOF

Tableau 5 : Variances expliquées par les 5 premières EOFs (à partir des données satellites de chlorophylle *a*) en pourcentage par mois.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EOF 1 | 48,67 | 30,12 | 39,23 | 28,38 | 39,63 | 38,31 | 56,17 | 54,71 | 49,2 | 51,38 | 41,41 | 44,95 |
| EOF 2 | 15,81 | 18,65 | 13,98 | 17,29 | 14,82 | 23,17 | 13,37 | 16,39 | 23,04 | 11,98 | 18,36 | 17,25 |
| EOF 3 | 10,46 | 11,66 | 10,57 | 10,02 | 13,17 | 10,85 | 8,22 | 9,99 | 7,87 | 10,33 | 11,73 | 13,22 |
| EOF 4 | 5,74 | 7,39 | 7,62 | 9,58 | 6,92 | 5,74 | 5,67 | 4,84 | 6,17 | 7,92 | 6,27 | 7,1 |
| EOF 5 | 4,26 | 7,18 | 5,73 | 7,2 | 6,51 | 5,46 | 4,38 | 3,77 | 3,26 | 4,44 | 4,67 | 3,77 |

Pour les mois de mars, juillet et octobre seulement la première EOF est au-dessus de 15% de variance expliquée ([Tableau 5](#)). Pour les autres mois, les deux premières EOF sont au-dessus de 15% de variance expliquée.

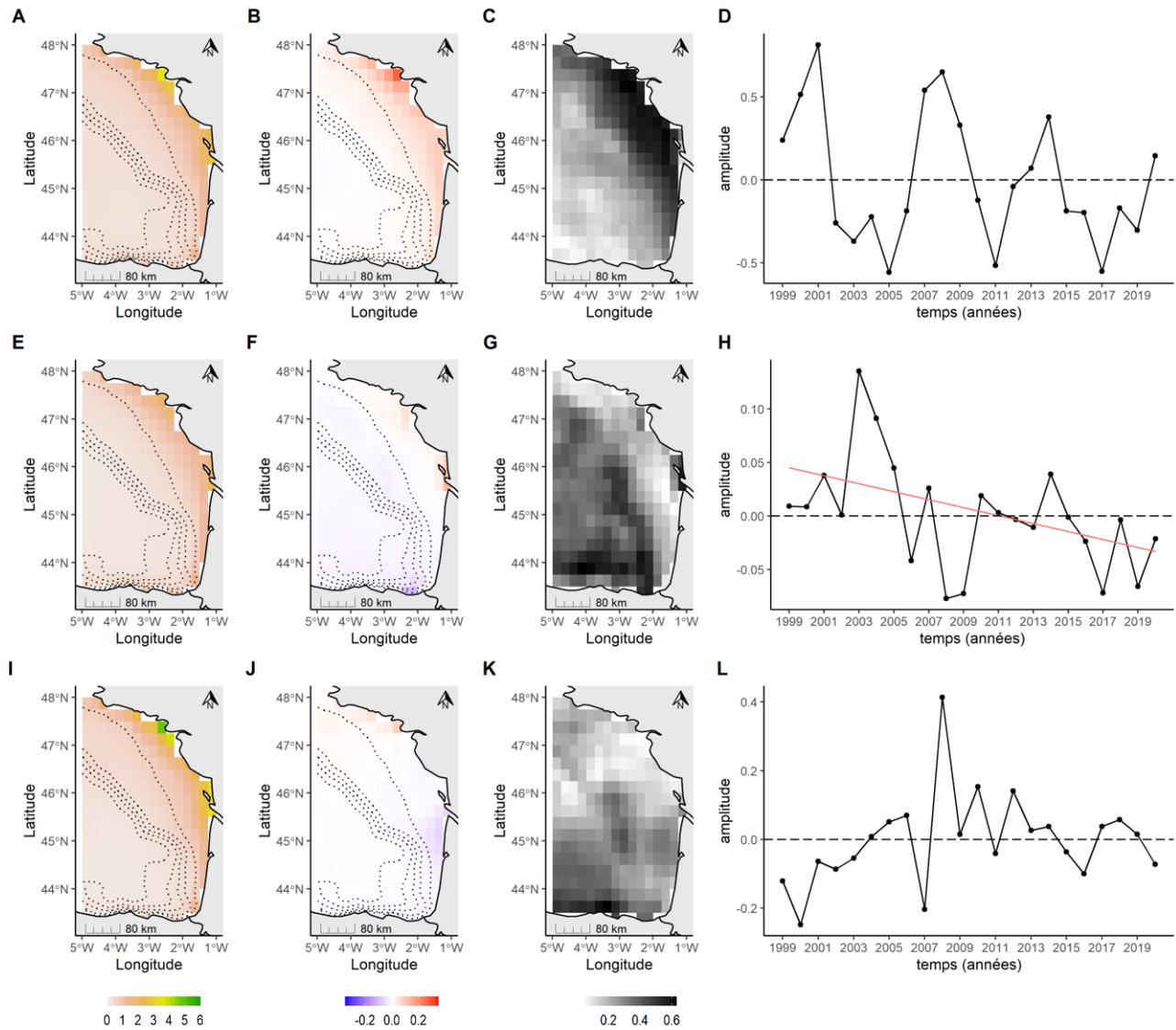


Figure 8 : Les trois patrons spatiaux de variabilité de la chlorophylle *a* dans le golfe de Gascogne, obtenus par analyse EOF et par regroupement des EOF par k-moyennes. A, B, C, D illustrent le premier groupe qui explique en moyenne 41,48 % de la variance autour du patron moyen mensuel, E, F, G, H illustrent le deuxième groupe qui expliquent en moyenne 17,51% de la variance et I, J, K, L le troisième groupe qui explique en moyenne 19,31% de la variance. La première colonne montre les patrons moyens de la température de surface (en $\mu\text{g/L}$) correspondant à la moyenne des mois sélectionnés dans le groupe. La deuxième colonne montre les patrons spatiaux de variabilité (moyenne des EOFs par groupe). Les lignes en pointillés représentent les isobathes tous les 100m de sonde. La troisième colonne montre les cartes de variances locales moyennes par groupe. Le continent est représenté en gris. La quatrième colonne montre les séries temporelles des amplitudes moyennes par groupe. La ligne rouge représente la pente de la tendance (Mann-Kendall) quand elle est significative.

2.2.1 Premier groupe

Tableau 6 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyennes pour le premier groupe. 1 signifie la présence de ce mois et de cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| EOF 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Le premier groupe est composé des EOF1 (qui expliquent la meilleure variance) de tous les mois ([Tableau 6](#)). Le mois d'avril est également représenté avec l'EOF2. Le patron spatial moyen de variabilité a des valeurs positives sur l'ensemble du golfe avec des valeurs plus importantes au niveau de la côte française, principalement à l'embouchure de la Loire et de la Vilaine ([Figure 8, B](#)). La variance moyenne locale expliquée est plus importante sur le plateau continental ([Figure 8, C](#)). L'amplitude moyenne du groupe associée au patron spatial montre des oscillations avec des pics positifs en 2000 et 2008 et des pics négatifs en 2005, 2011, 2017 ([Figure 8, D](#)). L'amplitude n'a pas de tendance significativement négative (Mann Kendall, $P=0,14$). L'amplitude est positivement corrélée au débit de la Loire (Spearman, $P=0,0004$) avec un coefficient de 0,71. L'amplitude est également corrélée aux vents de Nord-Est et de Nord-Ouest (Spearman, $P=0,042$, $P=0,026$) avec un coefficient de 0,44 et -0,48 respectivement.

2.2.2 Deuxième groupe

Tableau 7 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyennes pour le second groupe. 1 signifie la présence de ce mois et de cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| EOF 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Le deuxième groupe est composé des EOF2 des mois de novembre, décembre, janvier et février ([Tableau 7](#)). Le patron moyen de variabilité est positif aux embouchures de la Loire et de la Gironde et négatif au large et particulièrement dans le Sud du golfe de Gascogne ([Figure 8, F](#)). La variance locale moyenne est plus faible dans l'ensemble du golfe que pour le groupe 1 ([Figure 8, G](#)). L'amplitude moyenne associée au patron spatial a une tendance linéaire négative significative au seuil de 1^{ère} espèce de 0,05 (Mann Kendall, P= 0,015) de pente de -0,003 ([Figure 8, H](#)). L'amplitude du deuxième groupe est positivement corrélée au débit de la Loire (Spearman, P=0,015) avec un coefficient de 0,53. La taille-aux-âges 2 des sardines sont positivement corrélés à l'amplitude du deuxième groupe (Spearman, P=0,017) avec un coefficient de 0,53. La taille diminue avec le patron spatial de variation du groupe 2.

2.2.3 Troisième groupe

Tableau 8 : Récapitulatif des mois et des EOFs sélectionnés par la méthode de k-moyenne pour le troisième groupe. 1 signifie la présence de ce mois et de cette composante principale (EOF) dans le groupe, 0 signifie une absence.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| EOF 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| EOF 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Le troisième groupe est composé des EOF2 des mois de mai, juin, août et septembre ([Tableau 8](#)). Le patron spatial moyen de variabilité est positif au Sud de la Bretagne et de la Gironde et négatif au niveau et au Sud de l'embouchure de la Gironde ([Figure 8, J](#)). La variance locale moyenne est plus faible que dans le cas du groupe 1. La variance locale moyenne est plus forte au même endroit que le patron spatial, au Nord de la côte espagnole ([Figure 8, K](#)). L'amplitude moyenne associée au patron spatial n'a pas de tendance (Mann Kendall, P= 0,14). Elle a un pic positif en 2008 et 2 pics négatifs en 2000 et 2007 ([Figure 8, L](#)).

III Discussion

Les analyses en composantes principales, permettent de mettre en évidence la variabilité autour d'un patron moyen. Les résultats montrent une augmentation significative de la température par rapport aux températures moyennes pour les mois de janvier, février, mars, avril, mai, octobre, novembre et décembre dans le golfe de Gascogne. Pour les mois de janvier, février, mars, avril et mai, cette augmentation est plus forte au niveau de la côte française. Les mois d'octobre, novembre et décembre ont une augmentation de la température plus forte dans le sud du golfe de Gascogne.

Les EOF1 par mois pour la concentration en chlorophylle *a* ont montré un patron de variabilité similaire au patron moyen. Le premier groupe, contenant les EOF1 de chaque mois, a une amplitude moyenne qui se corrèle aux débits de la Loire. Le deuxième groupe correspond aux EOF2 des mois d'octobre, novembre, janvier et février. Le patron spatial moyen de variabilité pour ce groupe est également similaire aux patrons moyens mensuels de chlorophylle *a*, avec un contraste côte-large (positif à la côte et négatif au large). L'amplitude associée à ce patron de variabilité a une tendance négative et est également corrélée significativement au débit de la Loire. Le troisième groupe correspond aux EOF2 des mois de mai, juin, août et septembre. Le patron spatial moyen de variabilité de ce groupe montre un contraste entre le Sud de la Bretagne et l'embouchure de la Gironde.

1 Température

1.1 Evolution saisonnière

Le refroidissement de la température observé le long de la côte française pendant les mois d'hiver (de décembre à mars, [Figure 3](#)) est lié aux caractéristiques particulières de cette zone. La zone est sous l'influence des fleuves Gironde et Loire, dont les panaches sont à l'origine d'une inversion thermique due à la présence d'eau plus froide et moins salée provenant des débits des fleuves en hiver (Koutsikopoulos and Cann, 1996; Puillat *et al.*, 2004). Le vent hivernal de secteur ouest peut également jouer un rôle dans la différence de température de surface (Lazure and Jegou, 1998) puisqu'il disperse et enclave le panache dans la zone littorale. Par conséquent, l'eau de la zone littorale se réchauffe à un rythme différent de la zone au large. Au printemps la température de surface est homogène spatialement, puis en été, les eaux de surface se réchauffent dans le sud

du golfe dues à l'augmentation des températures saisonnières ([Figure 3](#)). Les upwellings côtiers sont caractérisés par un refroidissement des eaux côtières dû à une remontée des eaux plus profondes sous l'influence du vent de nord ou nord-ouest dans le golfe de Gascogne. Ils sont bien marqués de mai à septembre le long des côtes landaises et en sud-Bretagne (Pingree, 1984). Cependant il s'agit d'un phénomène transitoire, qui n'est pas visible sur les moyennes mensuelles de notre étude. En automne, (octobre et novembre), une masse d'eau chaude accumulée durant l'été dans le Sud se déplace vers le Nord sous forme d'une langue d'eau chaude côtière (Vincent and Kurc, 1969).

1.2 Variabilité de la température

En hiver, nos résultats montrent une augmentation de la température de surface au niveau de la côte française ([Figure 5](#), ligne 1). Koutsikopoulos *et al.* (1998) ont montré également que l'amplitude des variations saisonnières de la température de surface de 1972 à 1993 est plus prononcée près de la côte dans le secteur influencé par les estuaires. Les mêmes auteurs ont trouvé une plus grande variabilité pour les mois d'hiver que d'été, en accord avec nos résultats. Lima et Wethey (2012) ont étudié les tendances de la température côtière dans le monde entier de 1982 à 2010, ils ont obtenu une augmentation de la température (0,25°C en moyenne) le long de la côte du golfe de Gascogne. De plus, Gómez-Gesteira *et al.* (2008) ont également montré le même réchauffement de la température de surface le long de la côte. Il y a un réchauffement global sur la côte française dans le golfe de Gascogne, peut-être en lien avec les panaches des fleuves.

Le deuxième groupe est associé aux mois de transition (printemps et automne) et le début de l'hiver (mai, octobre, novembre et décembre) ([Figure 5](#), ligne 2). Son amplitude associée au patron spatial de variabilité a une tendance au réchauffement et plus spécialement dans le sud-est du golfe de Gascogne. Il s'agit du même patron spatial que les mois moyens d'été ([Figure 5](#), I). On peut donc supposer un prolongement de l'été pendant l'automne, au fur et à mesure des années. L'étude de Costoya *et al.* (2015) suggère également que les réchauffements mensuels de la température sont dûs au prolongement de la saison chaude plus qu'à des étés plus chauds ou des hivers plus doux. Cette hypothèse correspond aux études de Fontán *et al.* (2008) et Goikoetxea *et al.* (2009) avec des mois de transition de plus en plus courts. Ces auteurs décrivent la prévalence de longs étés chauds qui modifient le cycle saisonnier classique aux latitudes moyennes.

Le troisième groupe correspond aux mois d'été ([Figure 5](#), ligne 3), et ne représente aucune tendance, contrairement à l'étude de deCastro *et al.* (2009) qui a analysé des données satellitaires de température sur la période 1985-2006. Ils ont trouvé une forte augmentation de la température pendant l'été (0,54°C) affectant principalement la partie Nord du golfe de Gascogne. L'étude de Costoya *et al.* (2015) montre également un réchauffement lié à une augmentation du nombre d'événements chauds extrêmes pendant la saison estivale.

Les différentes études ont montré des taux de réchauffements différents, probablement en raison des différentes périodes, des données utilisées, et des méthodes d'analyse différentes. Mais globalement la température dans le golfe de Gascogne a tendance à se réchauffer. Les changements dans le calendrier de la saison chaude, avec un prolongement de l'été peuvent entraîner des changements importants dans les écosystèmes. Par exemple, les études de Sagarminaga et Arrizabalaga (2010) et Dufour *et al.* (2010) ont permis de faire le lien entre des changements dans la phénologie de la migration de poissons pélagiques et le réchauffement de la température printanière. L'augmentation significative de la température pourrait expliquer la diminution de la taille-aux-âges des sardines dans le golfe de Gascogne. Les changements environnementaux exposent les poissons à des conditions inhabituelles (augmentation de la température et diminution de la chlorophylle *a*), qui peuvent entraîner une utilisation de l'énergie induisant ainsi une diminution de la croissance des individus (Ohlberger, 2013). Le réchauffement de température peut également impacter la biomasse du phytoplancton, puisque la variation de température entraîne des variations de la profondeur de la couche de mélange (Somavilla *et al.*, 2009). Par conséquent, un prolongement des températures pourrait favoriser une stratification plus importante de la colonne d'eau. Ce fait complique l'apport de nutriments des couches plus profondes vers la couche euphotique en surface et donc la disponibilité des nutriments.

2 Chlorophylle *a*

2.1 Evolution saisonnière

Les estuaires de la Loire et de la Vilaine sont les principales sources continentales de nutriments pour le nord du Golfe de Gascogne (Monbet, 1992). Avant mars, la lumière et la turbulence dans l'eau, limitent la croissance du phytoplancton sur le plateau continental. Près de la côte, il n'y a pas de production de phytoplancton dans les panaches fluviaux avant le milieu du

printemps en raison de la limitation du phytoplancton par la lumière, due au flux de sédiments en suspension provenant du fleuve (Guillaud *et al.*, 2008). Au printemps (à partir d'avril), l'enrichissement local en nutriments à l'embouchure des rivières et la diminution de la turbidité permet la croissance du phytoplancton près des panaches. Cela se traduit par des pics de chlorophylle sur les cartes mensuelles (Figure 6). Tout au long de l'année, il y a une relation non-linéaire positive entre biomasse phytoplanctonique et les concentrations de nutriments (Ménèsquen *et al.*, 2018).

La moyenne mensuelle ne montre pas de bloom de phytoplancton, qui soit indépendant des apports de nutriments fluviaux côtiers. Pourtant, il y a régulièrement des blooms qui ne sont pas côtiers mais ils sont sans doute trop transitoires pour être visibles avec les moyennes mensuelles utilisées. Par exemple, au-dessus du rebord du plateau, lorsque la colonne d'eau est verticalement stratifiée (de mai à septembre), la marée génère des ondes internes responsables d'un important mélange et d'une remontée des nutriments, ce qui amène à des efflorescences phytoplanctoniques (Druon, 1998). Les blooms de chlorophylle *a* de fin d'hiver, peuvent avoir lieu en bordure du panache de la Gironde, en relation avec la stratification haline et des périodes anticycloniques après la mi-février (Guillaud *et al.*, 2008).

2.2 Variabilité

Le premier groupe d'EOFs de notre analyse concerne tous les mois de l'année. Le patron spatial de variabilité est similaire à la carte de la moyenne (Figure 8, ligne 1). Il y a une grande variabilité autour de ce patron moyen lié aux embouchures des fleuves. L'amplitude associée est corrélée positivement au débit de la Loire et à la vitesse du vent de Nord-Est qui étale les panaches fluviaux sur le plateau continental. La variabilité principale de la chlorophylle *a* (que montre ce premier groupe d'EOFs) serait donc liée, tout au long de l'année, aux apports de nutriments apportés par les panaches des fleuves, particulièrement la Loire. La variation du débit et de l'étalement du panache influence la concentration de chlorophylle *a* toute l'année, en y apportant et distribuant les nutriments nécessaires au développement du phytoplancton.

Le deuxième groupe d'EOFs a aussi un patron de variabilité (autour de la carte de la moyenne) au niveau des estuaires et en hiver (Figure 8, ligne 2). Cependant seuls les mois d'hiver sont concernés. De plus, il existe un contraste entre la côte et le large, s'il y a peu de production au

niveau de la côte française alors il y aura plus de production au large. Ce phénomène peut s'expliquer par des conditions météorologiques affectant différemment la côte et le large, comme le vent favorisant un mélange vertical. Cependant seulement le débit de la Loire est corrélé positivement à cette amplitude. Les débits peuvent expliquer la variation près des embouchures mais d'autres variables environnementales doivent expliquer la variation au large. Le deuxième groupe a une amplitude avec une tendance négative. La concentration de chlorophylle *a* à la côte diminue en hiver, au cours de la série. En contradiction Gohin *et al.* (2019) montre dans la Manche un net déclin de chlorophylle *a* mais aucune tendance significative dans le golfe de Gascogne.

Le troisième groupe d'EOFs explique une variabilité seulement pour les mois d'été, avec un contraste entre le Sud-Bretagne et l'estuaire de la Gironde. Cependant son amplitude ne se corrèle avec aucune variable (Figure 8, ligne 3). Différentes hypothèses sont possibles, comme l'étalement des panaches de la Gironde et de la Loire dans des sens opposés ou des upwellings côtiers spécifiques en Sud-Bretagne mais ce sont des phénomènes transitoires. D'autres variables environnementales que celles utilisées ici, pourraient expliquer ces variations. Il serait utile de mieux comprendre ce patron de variation puisque la chlorophylle *a* étant à la base de la chaîne alimentaire, son évolution pourrait permettre de comprendre l'évolution des niveaux trophiques supérieurs en été. La diminution significative de chlorophylle *a* en hiver dans le golfe de Gascogne peut expliquer la diminution de la taille-aux-âges des sardines, diminuant la quantité de ressources disponible pour le passage de l'hiver des sardines, ce qui peut influencer leur croissance.

3 Limites de l'analyse

Le calcul des anomalies se fait par mois, en soustrayant la moyenne mensuelle des années 1999 à 2020. Les calculs de la variabilité reposent sur ces anomalies. Des études ont effectué les mêmes analyses avec d'autres moyennes de référence par exemple Costoya *et al.* (2015) qui utilise des moyennes mensuelles des années 1982 à 2014. On peut se poser la question de quelle moyenne de référence utiliser. Entre les années 1999 à 2020, il y a eu des variations interannuelles de la température et de la chlorophylle *a*. Une étude plus approfondie de ces variations interannuelles serait judicieuse permettant de définir une ou plusieurs moyennes de référence. La variabilité étudiée est relative à la moyenne de référence utilisée (Costoya *et al.*, 2014). Dans notre approche,

si on rajoute des années, la moyenne va changer alors qu'il serait peut-être préférable qu'elle soit une référence et qu'elle ne change pas en fonction de la longueur de la série.

La procédure de calcul utilisée a nécessité des choix qui peuvent modifier les résultats (les patrons spatiaux), notamment le seuil sur les variances expliquées (valeurs propres) de 15%. Ce seuil nous a semblé pertinent mais l'ajout d'EOFs en considérant un seuil inférieur change les groupes et par conséquent les patrons spatiaux moyens de variabilité. D'autres choix ont été fait comme le nombre d'axes principaux et le nombre de groupes dans la classification des EOFs. Tous ces choix peuvent influencer les patrons spatiaux finaux et leurs amplitudes associées. Aussi, comme toute analyse en composantes principales, il faut se méfier des interprétations d'une EOF indépendamment des autres (Abdi *et al.*, 2013). Les conditions d'orthogonalité qui en découlent contraignent la structure des EOF, limitant l'interprétation. Il faut que la variance décroisse rapidement avec les premières valeurs propres pour faciliter l'interprétation (Jolliffe, 2002).

La résolution spatiale (la taille des mailles) et temporelle (dans notre étude le mois) a également un impact sur les résultats. Les études avec différentes résolutions spatiales (0,10° et 0,25°) et temporelles (15 jours et 3 mois) ont montré des groupes d'EOFs similaires avec des patrons spatiaux de variabilité similaires à cette étude. L'analyse semble dépendre peu de la résolution spatiale et temporelle dès que l'on prend des moyennes sur une durée supérieure aux phénomènes transitoires (upwellings ou efflorescences de quelques jours). De plus, l'analyse à l'échelle mensuelle ou journalière est une alternative pour comprendre l'étendue réelle des changements en cours et leur impact sur les écosystèmes marins (Costoya *et al.*, 2015). L'étude de chaque EOF mensuelle et une explication pour chaque EOF importante pourrait être intéressante. De plus avec une résolution temporelle plus petite autour de 5 jours ou un jour, l'analyse EOF peut mettre en évidence des phénomènes plus fins comme des upwellings ou des efflorescences limitées dans le temps.

Les amplitudes se corrèlent globalement assez mal aux variables explicatives choisies. Des modèles multilinéaires à plusieurs variables ont été également testés pour comprendre les mécanismes derrière les patrons spatiaux. Cependant, aucun modèle n'est ressorti, qui était interprétable. Ceci est probablement dû aux variables explicatives. Les indices climatiques étant eux aussi des variations, sont parfois compliqués à interpréter, tout comme le vent, calculé en secteur, qui est lui aussi difficile à interpréter en lien avec les indices climatiques. Une meilleure

définition des variables environnementales devrait être testée pour mieux comprendre les patrons spatiaux de variabilité.

L'utilisation des indices pose la question de leur mise à jour et donc, de comment prendre en compte les nouvelles années à venir. La question de la moyenne de référence se pose à nouveau. De plus, il faut une méthode permettant l'intégration d'une nouvelle année dans les analyses, tout en gardant les composantes principales de référence. On peut penser faire notre analyse sur une période de référence et considérer les années en dehors comme des lignes supplémentaires qui seraient projetées dans l'espace factoriel défini avec les années de référence. Cela permettrait de calculer de nouveaux indices sans changer les anciens indices.

IV Conclusion

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des cartes satellites de la température dans le golfe de Gascogne a permis de mettre en évidence le patron spatial de l'augmentation des températures de surface, en hiver et en automne. L'augmentation des températures au sud-est du golfe en octobre, novembre et décembre est probablement dû au prolongement de la saison estivale jusqu'au début de l'hiver (décembre). L'analyse de variabilité de la concentration en chlorophylle *a* conclu à une relation significative avec le débit de la Loire. De plus, l'étude montre une diminution de la chlorophylle *a* le long de la côte française, en hiver. En conséquence, la quantité de ressources diminue pour les niveaux trophiques supérieurs. Face au changement climatique, l'étude de la déviation de la température et de la chlorophylle *a* par rapport à une moyenne de référence pourrait illustrer son impact, notamment en ce qui concerne la prolongation d'une situation estivale jusqu'en hiver.

V Bibliographie

- Barnston, A.G. and Livezey, R.E. 1987. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**: 1083–1126.
- Bentamy, A., Piollé, J.F. and Prevost, C. 2021. Global Ocean Wind L4 Reprocessed 6 hourly Observations. Mercator Ocean International.
- Best, D.J. and Roberts, D.E. 1975. Algorithm AS 89: The Upper Tail Probabilities of Spearman's Rho. *Applied Statistics*, **24**: 377.
- Blessing, S., Fraedrich, K., Junge, M., Kunz, T. and Lunkeit, F. 2005. Daily North-Atlantic Oscillation (NAO) index: Statistics and its stratospheric polar vortex dependence. *metz*, **14**: 763–769.
- Costoya, X., deCastro, M. and Gómez-Gesteira, M. 2014. Thermohaline trends in the Bay of Biscay from Argo floats over the decade 2004–2013. *Journal of Marine Systems*, **139**: 159–165.
- Costoya, X., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M. and 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.
- deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I. and Gesteira, J.L.G. 2009. Present warming within the context of cooling–warming cycles observed since 1854 in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, **29**: 1053–1059.
- Deyoung, B., Harris, R., Alheit, J., Beaugrand, G., Mantua, N. and Shannon, L. 2004. Detecting regime shifts in the ocean: Data considerations. *Progress in Oceanography*, **60**.
- Doray, M., Petitgas, P., Romagnan, J.B., Huret, M., Duhamel, E., Dupuy, C., *et al.* 2018. The PELGAS survey: Ship-based integrated monitoring of the Bay of Biscay pelagic ecosystem. *Progress in Oceanography*, **166**: 15–29.
- Druon, J.N. 1998. Modelisation d'écosystèmes pelagiques dans le proche atlantique interactions entre les phénomènes physiques et biologiques. Paris 6.
- Dufour, F., Arrizabalaga, H., Irigoien, X. and Santiago, J. 2010. Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution. *Progress in Oceanography*, **86**: 283–290.
- Fontán, A., Valencia, V., Borja, A. and Goikoetxea, N. 2008. Oceano-meteorological conditions in the SE Bay of Biscay for the period 2001–2005. A comparison with the last two decades. *Journal of Marine Systems*, **72**: 167–177.
- Frontier, S., Pichod-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D. and Luczak, C. 1998. *Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution*. Dunod, 4ème édition, Paris.
- 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 Science*, **7**: 705–732. Copernicus GmbH.

- Gohin, F., Druon, J.N. and 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. Taylor & Francis.
- Gohin, F., Van der Zande, D., Tilstone, G., Eleveld, M.A., Lefebvre, A., Andrieux-Loyer, F., *et al.* 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.
- Goikoetxea, N., Borja, Á., Fontán, A., González, M. and Valencia, V. 2009. Trends and anomalies in sea-surface temperature, observed over the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, **29**: 1060–1069.
- Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Alvarez, I. and 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.
- Guillaud, J.-F., Aminot, A., Delmas, D., Gohin, F., Lunven, M., Labry, C., *et al.* 2008. Seasonal variation of riverine nutrient inputs in the northern Bay of Biscay (France), and patterns of marine phytoplankton response. *Journal of Marine Systems*, **72**: 309–319.
- Hamed, K.H. and Ramachandra Rao, A. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, **204**: 182–196.
- Hare, S. and Mantua, N. 2000. Empirical Evidence for North Pacific Regime Shifts in 1977 and 1989. *Progress In Oceanography*, **47**: 103–145.
- Hartigan, J.A. and Wong, M.A. 1979. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, **28**: 100.
- Harvell, D., Aronson, R., Baron, N., Connell, J., Dobson, A., Ellner, S., *et al.* 2004. The rising tide of ocean diseases: unsolved problems and research priorities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **2**: 375–382.
- Hollander, M. and Wolfe, D.A. 1973. Kendall and Spearman tests. In: *Nonparametric Statistical Methods*, pp. 185–194. Wiley.
- Hotelling, H. 1935. The most predictable criterion. *Journal of Educational Psychology*, **26**: 139–142.
- Jackson, J.B.C., Kirby, M.X., Berger, W.H., Bjorndal, K.A., Botsford, L.W., Bourque, B.J., *et al.* 2001. Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science*, **293**: 629–637.
- Jolliffe, I.T. 2002. *Principal Component Analysis*. Springer Science & Business Media.
- Kaiser, H.F. 1991. Coefficient Alpha for a Principal Component and the Kaiser-Guttman Rule. *Psychol Rep*, **68**: 855–858.
- Koutsikopoulos, C., Beillois, P., Leroy, C. and Taillefer, F. 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. *Oceanologica Acta*, **21**: 335–344.
- Koutsikopoulos, C. and Cann, B.L. 1996. Physical processes and hydrological structures related to the Bay of Biscay anchovy. *Scientia Marina*, **60**: 9–19.

- Kutzbach, J.E. 1967. Empirical Eigenvectors of Sea-Level Pressure, Surface Temperature and Precipitation Complexes over North America. *J. Appl. Meteor.*, **6**: 791–802.
- Lazure, P. and Jegou, A.-M. 1998. 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica Acta*, **21**: 165–177. Gauthier-villars/editions Elsevier.
- Lima, F.P. and Wetthey, D.S. 2012. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nat Commun*, **3**: 704.
- MacQueen, J.B. 1967. Some Methods for Classification and Analysis of MultiVariate Observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability: Weather modification*, pp. 281–297. University of California Press.
- Ménesguen, A., Dussauze, M. and Dumas, F. 2018. 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 & Coastal Management*, **163**: 37–53.
- Monbet, Y. 1992. Control of phytoplankton biomass in estuaries: A comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries. *Estuaries*, **15**: 563–571.
- Murtagh, F. and Legendre, P. 2014. Ward’s Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward’s Criterion? *J Classif*, **31**: 274–295.
- Ohlberger, J. 2013. Climate warming and ectotherm body size – from individual physiology to community ecology. *Functional Ecology*, **27**: 991–1001.
- Pandolfi, J.M., Bradbury, R.H., Sala, E., Hughes, T.P., Bjorndal, K.A., Cooke, R.G., *et al.* 2003. Global Trajectories of the Long-Term Decline of Coral Reef Ecosystems. *Science*, **301**: 955–958.
- 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*, **2**: 559–572.
- Petitgas, P., Doray, M., Huret, M., Massé, J. and 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.
- Pingree, R.D. 1984. Some Applications of Remote Sensing to Studies in the Bay of Biscay, Celtic Sea and English Channel. In: *Elsevier Oceanography Series*, pp. 287–315. Elsevier.
- Puillat, I., Lazure, P., Jégou, A.M., Lampert, L. and 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.
- Ramachandra Rao, A., Hamed, K.H. and Chen, H.-L. 2003. *Nonstationarities in Hydrologic and Environmental Time Series*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sagarminaga, Y. and Arrizabalaga, H. 2010. Spatio-temporal distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) catches in the northeastern Atlantic: relationship with the thermal environment. *Fisheries Oceanography*, **19**: 121–134.
- Saulquin, B. and Gohin, F. 2010. Mean seasonal cycle and evolution of the sea surface temperature from satellite and in situ data in the English Channel for the period 1986-2006. *International Journal*

Of Remote Sensing (0143-1161) (Taylor & Francis Ltd), 2010-08 , Vol. 31 , N. 15 , P. 4069-4093, 31.

Somavilla, R., González-Pola, C., Rodríguez, C., Josey, S.A., Sánchez, R.F. and Lavín, A. 2009. Large changes in the hydrographic structure of the Bay of Biscay after the extreme mixing of winter 2005. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **114**.

Storch, H. von and Zwiers, F.W. 1984. *Statistical Analysis in Climate Research*, 1st ed. Cambridge University Press.

Vincent, A. and Kurc, G. 1969. Hydrologie variations saisonnières de la situation thermique du Golfe de Gascogne en 1967. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes*, **33**: 79–96. ISTPM.

Wuillez, M., Petitgas, P., Huret, M., Struski, C. and 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.

Rapport de stage Master 2 Modélisation en écologie (MODE) de
L'Université de Rennes 1, année universitaire : 2021-2022
Réalisé par Marine Dorand

RESUME

L'océanographie opérationnelle fournit depuis 20 ans des cartes satellites quotidiennes de la surface de la mer pour la température et la chlorophylle *a*. En météorologie, des données similaires existent sous forme de champs de pression atmosphériques. Leur analyse spatio-temporelle a permis d'identifier des situations météorologiques caractéristiques et récurrentes (modèles spatiaux) et de fournir des indices d'amplitude pour ces modèles. Notre étude adopte une approche similaire pour l'analyse des séries de cartes satellitaires mensuelles de température de surface de la mer et de chlorophylle *a* sur le golfe de Gascogne (43°N - 48°N, 0°W - 5°W). Des Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF) sont appliquées par mois à la série de cartes de 1999 à 2020 afin d'extraire les patrons spatiaux de variabilités cohérents dans le temps et la série temporelle de leurs amplitudes associées. Les EOFs sont ensuite classés en groupe pour identifier les modèles spatiaux similaires au fil des années et des mois. Un indice moyen par année est calculé pour chaque patron spatial moyen de variabilité identifié du groupe. L'analyse montre que la température de surface de la mer a augmenté en hiver, entre 1999 et 2020, en raison de la variabilité saisonnière dans les eaux côtières. Les températures automnales ont également augmenté, en raison d'une prolongation de la saison estivale. La variabilité de la chlorophylle *a* est liée aux débits de la Loire et concerne tous les mois de l'année. Cependant, la chlorophylle *a* a diminué, au niveau des embouchures de la Loire et de la Gironde en hiver. Les séries d'indices correspondent à de nouvelles séries temporelles environnementales qui peuvent expliquer statistiquement les variations de la condition des niveaux trophiques supérieurs.

Mots clés : Golfe de Gascogne, Température de surface, Chlorophylle *a*, Variation saisonnière, Empirical Orthogonal Function, Données satellites, Indices environnementaux.

ABSTRACT

Operational oceanography provides since 20 years satellite-derived daily sea surface maps of temperature and chlorophyll *a*. In meteorology, similar data exist as atmospheric pressure fields. Their space-time analysis has allowed the identification of characteristic and recurrent meteorological situations (spatial patterns) and provide amplitude indices for these patterns. Our study adopts a similar approach for analyzing the series of satellite-derived monthly sea surface maps of temperature and chlorophyll *a*, over the Bay of Biscay (43°N - 48°N, 0°W - 5°W). Empirical Orthogonal Functions (EOF) were applied by month to the series of maps to extract spatial eigen vectors consistent in time and the time series of their associated amplitudes. The EOFs were then grouped to identify similar spatial patterns over years and months. An average index per year is calculated for each identified spatial pattern in the group. The analysis shows that sea surface temperature has increased in winter from 1999 to 2020, emerging to seasonal variability in coastal waters. Fall temperatures have also increased, due to an extension of the summer season. In all months of the year, the variability of chlorophyll *a* is related to Loire River flows. However, chlorophyll *a* decreased at the mouths of the Loire and Gironde rivers in winter. The index series correspond to new environmental time series that may be statistically explain variations in higher trophic levels condition.

Key-words: Bay of Biscay, Sea surface temperature, Chlorophyll *a*, Seasonal changes, Empirical Orthogonal Function, Satellite data, Environmental index.