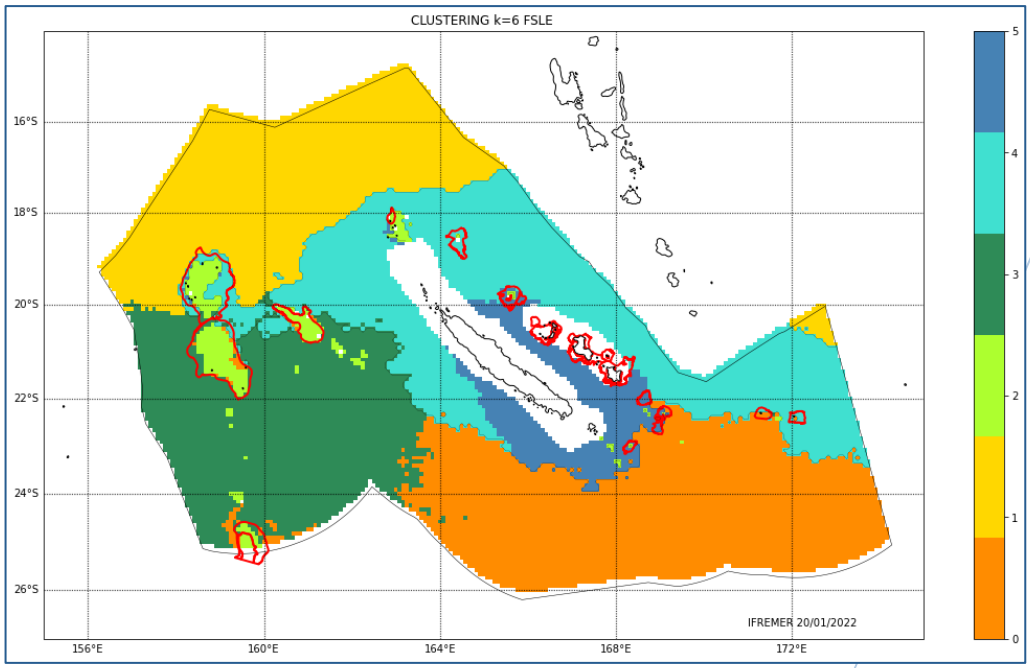


DÉCOUPAGE DE L'ESPACE MARIN EN MASSES D'EAU HOMOGENES :

Une analyse de sensibilité aux paramètres de découpe, appliquée au Parc Naturel de la Mer de Corail, Nouvelle-Calédonie

Projet PRESENCE -

Andréa Evrard, Anne-Lou Schaefer, Oriane Bruyère, Simon Van Wynsberge, Benoît Soulard, Hugues Lemonnier, Thierry Jauffrais, Romain Le Gendre

Mars 2023

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 3

2. MATERIEL ET METHODE 4

2.1. ZONE D'ETUDE 4
2.1.1. Emprises de la zone d'étude 4
2.1.2. Climat 5
2.1.3. Bathymétrie 5
2.1.4. Courants de surface 6
2.1.5. Richesse biologique 7
2.2. SOURCES DE DONNEES ET PARAMETRES UTILISES 7
2.3. JEUX DE PARAMETRES CONSIDERES POUR LES DECOUPAGES 9
2.4. METHODE DE CLASSIFICATION 10
2.4.1. K-means 10
2.4.2. Détermination du nombre de groupes 10
2.4.3. Stabilité des frontières 11
2.5. WORKFLOW 13

3. RESULTATS 15

3.1. MOYENNE ET ECART-TYPE DES DONNEES SUR LA PERIODE 2003-2019 15
3.1.1. Température de l'eau en surface 15
3.1.2. Chlorophylle-a en surface 16
3.1.3. FSLE 18
3.1.4. Fer dissous en surface 19
3.1.5. Silice dissous en surface 20
3.1.6. Nitrate dissous en surface 21
3.1.7. Phosphate dissous en surface 22
3.1.8. Oxygène dissous en surface 23
3.2. NOMBRE OPTIMAL DE GROUPES 24
3.3. CLASSIFICATION DE L'ESPACE MARIN EN REGIONS 26
3.3.1. JDD-1 « Classique » 29
3.3.2. JDD-2 « Connectivité » 29
3.3.3. JDD-3 « Biogéochimique » 30
3.4. DESCRIPTION DES FRONTIERES 31
3.4.1. JDD-1 32
3.4.2. JDD-2 32
3.4.3. JDD-3 33

4. DISCUSSION 33

4.1. NOMBRE DE GROUPE OPTIMAL K=5 OU K=6 33
4.2. SENSIBILITE A L'EMPRISE 33
4.3. INFLUENCE DU JEU DE DONNEES 34
4.4. STABILITE DES FRONTIERES 34

5. SYNTHESE 35

6. BIBLIOGRAPHIE 36

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Limites administratives du Parc Naturel de la Mer de Corail Extrait de https://mer-de-corail.gouv.nc/fr.QW 4
Figure 2. Illustration simplifiée de la géomorphologie des fonds marins de la Nouvelle-Calédonie. (C. Geoffray, L. Gardes / Agence des Aires Marines Protégées) Cercle rouge : ride de Lord Howe. Cercle bleu : ride de Fairway. Cercle jaune : ride de Norfolk..... 5

Figure 3 : Bathymétrie de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie (Source : Gebco). Le trait noir représente la délimitation de la ZEE. L'échelle de couleur est en mètres. 6
Figure 4 : Circulation océanique du Pacifique sud-ouest. Abréviations importantes dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie : SEC (South Equatorial Current), NCJ (North Caledonian Jet), STCC (Sub Tropical Counter Current) (Marchesiello et al., 2010). 7
Figure 5. Récapitulatif des jeux de paramètres utilisés pour la classification de l'espace marin de la ZEE de Nouvelle-Calédonie. 9
Figure 6: Critère de détermination des bordures : les pixels en bleu et blanc appartiennent respectivement à deux groupes différents ; en jaune il s'agit d'un pixel frontière. 12
Figure 7 : Illustration du processus de détermination de frontière à partir de l'exemple du découpage de janvier 2003 pour le JDD-1. A gauche la figure représente le découpage obtenu pour janvier 2003 et à droite, il s'agit des frontières déduites de la figure gauche..... 12
Figure 8 : Carte représentant la stabilité des frontières établie pour le JDD-1 "classique". 13
Figure 9 : Workflow détaillant la méthode de classification mise en place. La méthode est illustrée dans le cas particulier du découpage du PNMC avec le jeu de données classique JDD-1. 14
Figure 10 : Moyenne des données mensuelles de la température surface de l'eau en degré °C de 2003 à 2019. 15
Figure 11 : Écart-type des données mensuelles de la température surface de l'eau en degré °C de 2003 à 2019. 16
Figure 12 : Moyenne des données mensuelles de chlorophylle-a en mg/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 17
Figure 13 : Écart-type des données mensuelles de chlorophylle-a en mg/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 17
Figure 14. Moyenne des données mensuelles de FSLE de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 18
Figure 15. Écart-type des données mensuelles de FSLE de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie..... 18
Figure 16. Moyenne des données mensuelles de fer dissous en surface en µmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 19
Figure 17. Écart-type des données mensuelles de fer dissous en surface en µmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 20
Figure 18. Moyenne des données mensuelles de silice dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 20
Figure 19. Écart-type des données mensuelles de silice dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 21
Figure 20. Moyenne des données mensuelles de nitrate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 21
Figure 21. Écart-type des données mensuelles de nitrate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 22
Figure 22. Moyenne des données mensuelles de phosphate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 22
Figure 23. Écart-type des données mensuelles de phosphate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 23
Figure 24. Moyenne des données mensuelles d'oxygène dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 23
Figure 25. Écart-type des données mensuelles d'oxygène dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. 24
Figure 26 : Détermination du nombre optimal de groupe pour chaque cas de figure. Pour chaque jeu de données, en haut : méthode de l'optimisation de l'inertie ; en bas : méthode de l'indice de

silhouette. La valeur de k surlignée représente la valeur définitive choisie, et représente la synthèse des deux méthodes. 25
Figure 27 : Classifications de l'espace marin en masses d'eaux homogènes selon le jeu de paramètre et l'emprise considérés. 26
Figure 28 : Stabilité des frontières dans chaque cas de figure. La colorbar indique le pourcentage du temps où un pixel a été défini comme frontière (0 à 100%)..... 32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Variables considérées pour l'analyse et leurs caractéristiques 8
Tableau 2 : Tableau récapitulatif du nombre de groupe optimal en fonction du découpage considéré. 26
Tableau 3 : Moyennes et écart-types des variables environnementales pour chaque groupe (représentés par les couleurs de la Figure 27) de chaque jeu de paramètres. SST : température de surface de l'eau ; Chla : concentration en chlorophylle-a en surface ; FSLE : exposants de Lyapunov à taille finie ; O2 : concentration en oxygène dissous ; Si : concentration en silice ; NO3 : concentration en nitrate ; PO4 : concentration en phosphate ; Fe : concentration en fer dissous. Les valeurs moyennes importantes sont représentées par des nuances de jaune. 27
Tableau 4. Comparaison de la valeur moyenne normalisée de chaque variable pour chaque cluster et chaque jeu de paramètres. 1a et 1b) en haut : CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; en bas : bathymétrie ; à droite : SST (température de surface de l'eau). 2a et 2b) en haut : CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; à gauche : bathymétrie ; à droite : SST (température de surface de l'eau) ; en bas : FSLE (Exposants de Lyapunov à taille finie). 3a et 3b) dans le sens horaire en partant de la gauche : O2 (concentration en oxygène dissous) ; NO3 (concentration en nitrate) ; Fe (concentration en fer dissous) ; CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; Si (concentration en silice) ; PO4 (concentration en phosphate)..... 28

CITATION

Ce rapport doit être cité comme suit :

Andréa Evrard, Anne-Lou Schaefer, Oriane Bruyère, Simon Van Wynsberge, Benoît Soulard, Hugues Lemonnier, Thierry Jauffrais, Romain Le Gendre. (2023). Découpage du Parc Naturel de la Mer de Corail de la Nouvelle-Calédonie en masses d'eau homogènes : une analyse de sensibilité aux paramètres de découpe, appliquée au Parc Naturel de la mer de Corail, Nouvelle-Calédonie. 42 pages

MOTS CLES

Nouvelle-Calédonie, Parc Naturel de la Mer de Corail, Océan Pacifique, ZEE, Hydrodynamique, Satellite, Projet PRESENCE.

INFORMATION

Ce rapport fait suite au stage de césure d'Andréa Evrard (ENSAM) du 01/09/2021 au 28/02/2022.

1. INTRODUCTION

La bio-régionalisation est un processus qui vise à délimiter spatialement des zones au sein desquelles les conditions physiques, les caractéristiques biogéochimiques des masses d'eau ou les communautés biologiques sont raisonnablement homogènes (Nieblas et al., 2014). Ce processus se base souvent sur l'exploitation de données issues de modèles et de satellites puisqu'il est indispensable de posséder une vaste couverture spatiale et temporelle des paramètres physico-chimique et/ou biologique des masses d'eau. Classifier spatialement les masses d'eaux permet de fournir des informations pertinentes pour alimenter des plans de gestion des écosystèmes marins. En effet, produire une classification spatialement explicite des masses d'eaux permet de délimiter des unités spatiales (provinces marines) pouvant être utilisées comme support pour orienter/structurer l'échantillonnage des plans de suivi de la qualité du milieu marin, pour identifier des zones prioritaires pour la protection des écosystèmes et la gestion des activités humaines, pour la modélisation et la prévision des impacts et des changements induits par le climat, ou encore pour orienter au mieux la répartition des efforts de recherche (Spalding et al., 2007 ; Hobday et al., 2011 ; Rice et al., 2011 ; Beliaeff et al., 2011).

Au cours des dernières décennies, des découpages de l'espace sur la base de données satellite et/ou modèles ont été entrepris dans de nombreuses régions, que ce soit à l'échelle globale (Spalding et al., 2012) ; à l'échelle d'un océan ou d'une mer (Grant et al., 2006; Reygondeau et al., 2017); ou encore à l'échelle d'un pays comme la Nouvelle-Zélande (Snelder, 2007), ou de la Nouvelle-Calédonie (Gardes et al., 2014). Toutefois, peu d'études ont testé l'effet des paramètres choisis sur les résultats de découpage. Parmi ces paramètres figurent, notamment, l'emprise considérée pour la zone d'étude. En particulier pour le Parc Naturel de la Mer de Corail (PNMC), qui a vocation à s'intégrer dans une logique de conservation à une échelle qui dépasse les frontières de la Zone Économique Exclusive (ZEE) calédonienne, il est nécessaire de clarifier dans quelle mesure la prise en compte des masses d'eaux limitrophes à la ZEE peut influencer significativement les paysages obtenus au sein de celle-ci. Par ailleurs, le choix des variables à intégrer dans l'analyse pose également question. Pour une même région océanique, plusieurs découpages peuvent être proposés en fonction des variables environnementales dont on souhaite (et dont on peut) tenir compte. A l'occasion du projet Mermex (Ayata et al., 2018), de multiples régionalisations du bassin méditerranéen ont été proposées en adoptant différentes variables biogéochimiques, biologiques ou hydrodynamiques (Reygondeau et al., 2017 ; Nieblas et al., 2014 ; Rossi et al., 2014). Bien que les variables les plus communément utilisées dans ce type de découpages sont la température de surface (Sea Surface Temperature : SST), la bathymétrie et la chlorophylle de surface, les avancées récentes en matière de télédétection et de modélisation hydrodynamique ouvrent de nouvelles perspectives. Par exemple, le développement des Finite Size Lyapunov Exponent (FSLE) permet d'envisager d'intégrer des notions de connectivité dans la définition des paysages marins. Cet outil est un produit dérivé de l'altimétrie mis à disposition en libre accès par le programme Aviso + qui permet de rendre compte d'une expérience de traceurs. D'autre part, le modèle Global Ocean Biogeochemistry hindcast fournit des données biogéochimiques à grande échelle, avec une fiabilité qui peut être considérée acceptable (Perruche et al., 2019).

L'objectif principal de cette étude est de définir une méthodologie adaptée au découpage de l'espace maritime calédonien. Pour cela, nous avons évalué la sensibilité des découpages à différents paramètres de découpage, en s'appuyant sur l'espace maritime du Parc Naturel de la Mer de Corail en Nouvelle-Calédonie comme support d'étude. Les paramètres de découpage testés incluent la combinaison de variables utilisées en entrée des analyses, et l'étendue spatiale prise en compte (ZEE sensu stricto, versus ZEE et zones alentours). Cette analyse exploratoire a vocation à fournir aux gestionnaires un premier jeu de paysages océaniques cohérents à l'échelle

du PNMC, et d'identifier les choix méthodologiques/stratégiques les plus susceptibles d'influencer les résultats et qui nécessitent donc une attention toute particulière de leur part.

2. MATERIEL ET METHODE

L'objectif étant assez méthodologique, le choix a été fait de ne travailler dans un premier temps qu'avec des variables de surface.

2.1. Zone d'étude

2.1.1. Emprises de la zone d'étude

Comme cas d'étude, l'analyse se concentre sur la Zone Économique Exclusive (ZEE) de la Nouvelle-Calédonie classée « Parc Naturel de la Mer de Corail » en 2014. Cette zone, sous compétence du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, fait l'objet de mesures de protections spécifiques (arrêté n°2014-1063/GNC du 23 avril 2014). La ZEE de la Nouvelle-Calédonie s'étend sur environ 1,3 million de km^2 et est délimitée à l'ouest et au sud par l'Australie, au nord par les îles Salomon et à l'est par le Vanuatu et Fidji.[1] L'emprise de la ZEE exclut les eaux territoriales et intérieures de la Grande Terre et des îles Loyautés qui sont sous juridiction provinciale (Fig. 1) mais inclut par contre tous les récifs éloignés (e.g Chesterfield, Bellona, Entrecasteaux).

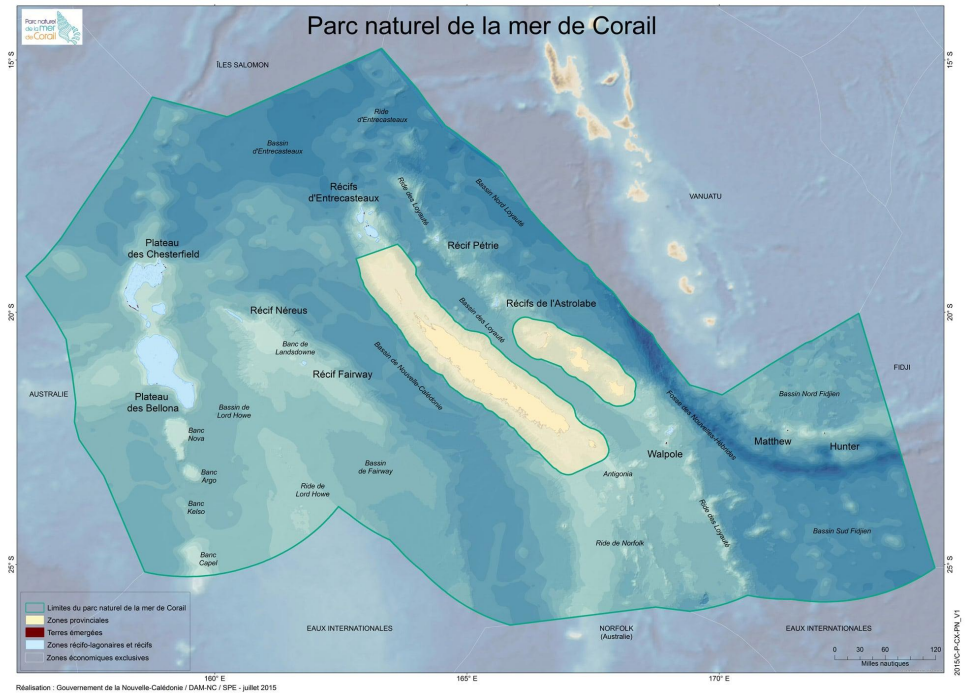


Figure 1: Limites administratives du Parc Naturel de la Mer de Corail Extrait de https://mer-de-corail.gouv.nc/fr.QW

Le PNMC est contenu dans une emprise « rectangulaire » allant de -17°N à -23°N et de 155°E à 175°E que l'on nommera 'emprise étendue' dans la suite du document. Les deux emprises (ZEE et emprise étendue) ont fait l'objet d'une classification afin d'identifier l'impact de l'étendue de la zone d'étude sur le clustering final obtenu.

[1] https://limitesmaritimes.gouv.fr/ressources/tableau-des-superficies

2.1.2. Climat

Par sa localisation subtropicale, la Nouvelle-Calédonie est sous l'influence d'un climat tropical tempéré, bien que la forte présence des Alizés (les vents dominants de secteur Sud-Est) balance les effets de ce dernier. On distingue deux saisons principales au cours de l'année (Caudmont et Maitrepierre, 2006) :

- de novembre à avril : une saison chaude et humide rythmée par des précipitations abondantes et des épisodes dépressionnaires, c'est la saison cyclonique.

- de mai à octobre : une saison fraîche et plus sèche, c'est l'hiver austral.

Une période de transition s'observe lors du passage d'une saison à l'autre.

2.1.3. Bathymétrie

Le domaine présente une grande diversité de structures géomorphologiques. Il existe trois rides continentales (Lord Howe, Fairway, Norfolk), des rides volcaniques formées de monts sous-marins (149 au total) et de guyots (Fig. 2). Entre chacune de ces rides, de grands bassins sédimentaires s'étendent dont la profondeur varie entre 2000 et 4000m. Les plus grandes profondeurs du parc se trouvent au niveau de la fosse de subduction des Nouvelles-Hébrides, entre la ride des Loyautés et l'archipel du Vanuatu, où la profondeur atteint 7000m (Fig. 3).

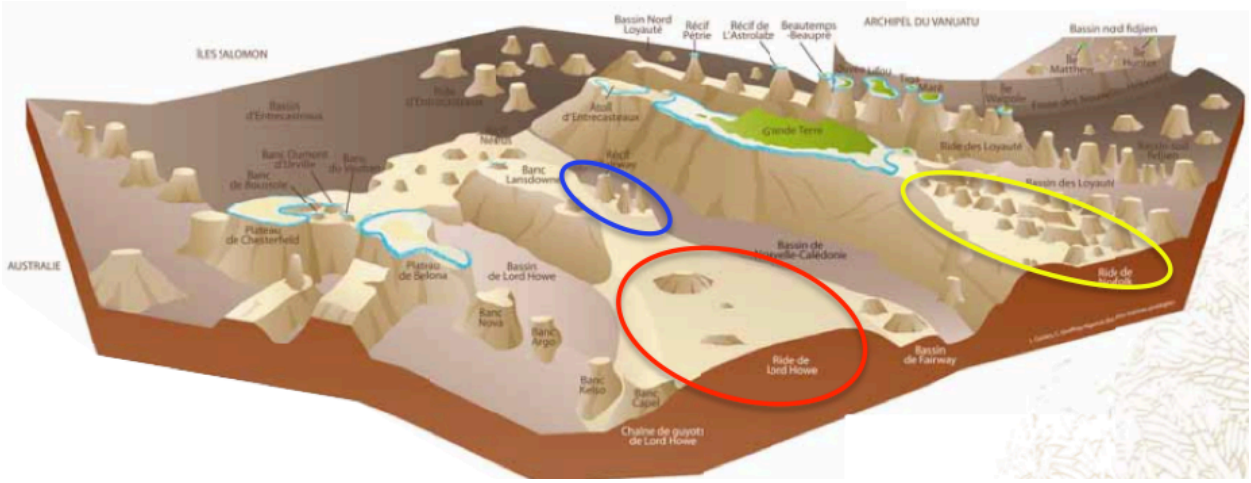


Figure 2. Illustration simplifiée de la géomorphologie des fonds marins de la Nouvelle-Calédonie. (C. Geoffray, L. Gardes / Agence des Aires Marines Protégées) Cercle rouge : ride de Lord Howe. Cercle bleu : ride de Fairway. Cercle jaune : ride de Norfolk.

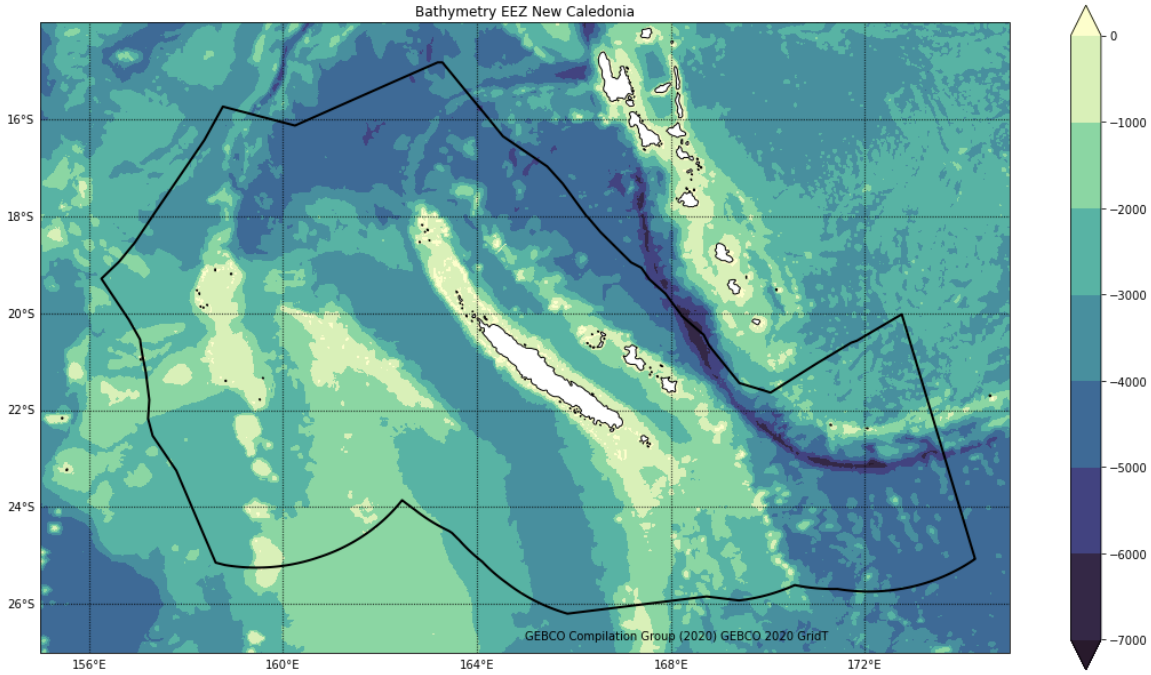


Figure 3 : Bathymétrie de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie (Source : Gebco). Le trait noir représente la délimitation de la ZEE. L'échelle de couleur est en mètres.

2.1.4. Courants de surface

Les courants de surface du Nord-Ouest, Nord et Est de la ZEE sont dominés par le courant sud équatorial (SEC) transportant des eaux chaudes et peu salées vers l'ouest (Cravatte et al., 2015). D'autre part, le courant d'Australie orientale donne naissance à un contre-courant subtropical (STCC) à l'Ouest et au Sud de la Nouvelle-Calédonie orienté vers l'Est (Fig. 4). Ce courant est composé d'eau froide et salée.

Plus particulièrement, la Nouvelle-Calédonie est bordée par des courants nord-sud qui longent le récif barrière (Marchesiello et al., 2010) :

- Alis à l'Ouest, issue du contre-courant subtropical STCC.

- Vauban à l'Est qui passe entre la Grande Terre et les îles Loyautés.

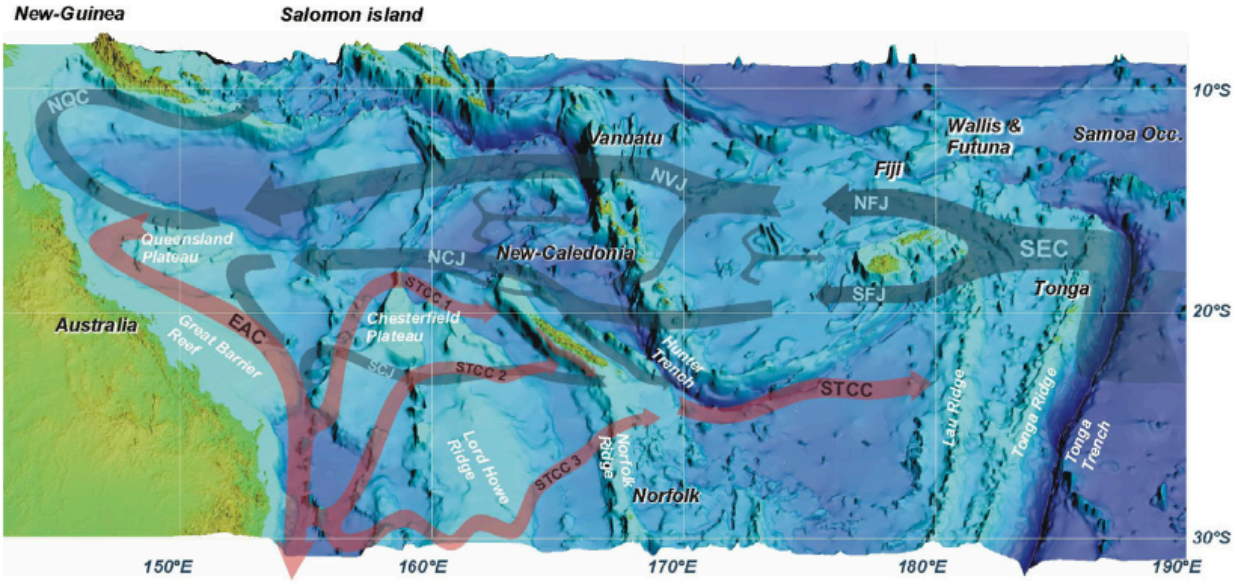


Figure 4 : Circulation océanique du Pacifique sud-ouest. Abréviations importantes dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie : SEC (South Equatorial Current), NCJ (North Caledonian Jet), STCC (Sub Tropical Counter Current) (Marchesiello et al., 2010).

Ces grandes circulations sont impactées par la présence de la Grande Terre, les monts sous-marins et autres éléments de relief qui induisent une certaine variabilité dans les schémas de circulation locaux. A leur tour, les courants induits entrainent une modification des caractéristiques physico-chimiques du milieu et donc biologiques. Par exemple, la présence et l'orientation de la Grande Terre et des récifs barrières engendrent des courants appelés upwellings côtiers : phénomènes physiques de remontée d'eau froide en surface créés sous l'action du vent et souvent riches en nutriments (Marchesiello et al., 2010).

2.1.5. Richesse biologique

Les eaux environnantes de la Nouvelle-Calédonie abritent une biodiversité remarquable notamment au niveau des monts sous-marins, habitats isolés qui constituent des hotspots de biodiversité (Samadi et al., 2006). Les biomasses d'organismes benthiques et pélagiques y atteignent des valeurs plus élevées que dans le reste de l'océan (Morato, 2010). La présence des monts sous-marins génère des turbulences et des flux verticaux de nutriments qui favorisent la productivité primaire, laquelle alimente à son tour la production aux niveaux trophiques supérieurs, ce qui entraîne des conditions favorables à la présence d'espèces pélagiques (White et al., 2007). Ces zones attirent la mégafaune marine comme la baleine à bosse avec des fréquentations parfois plus importantes que dans les zones côtières (Derville et al., 2018).

2.2. Sources de données et paramètres utilisés

La cartographie de la qualité de l'eau pour alimenter un découpage de masses d'eaux est difficilement envisageable via des mesures *in situ,* de par la taille de la zone d'étude et la nécessité de disposer de longues séries temporelles pour réaliser un découpage représentatif des conditions moyennes. Ainsi, le découpage des masses d'eau homogènes réalisé dans cette étude se base uniquement sur des données open source issues de modèles numériques ou de produits

satellitaires. Néanmoins, il est nécessaire de souligner que les données satellitaires, notamment celles relatives aux variables biogéochimique, sont à résolution grossière, ce qui peut affecter la fiabilité des résultats. Il est important de considérer cette limitation lors de l'interprétation des résultats.

Plusieurs types de données spatialisées, issues de la télédétection ou de la modélisation, ont été regroupées (Tableau 1) : la bathymétrie, la température des eaux de surface des océans, la concentration en chlorophylle *a*, le taux de séparation des trajectoires de particules initialement proches ainsi que différentes variables biogéochimiques. La période retenue pour l'analyse de l'ensemble des variables est de janvier 2003 à décembre 2019, soit un jeu de données de 17 ans.

Tableau 1 : Variables considérées pour l'analyse et leurs caractéristiques

Produit	Organisme	Type	Données	Unités	Résolution spatiale	Période disponible
GEBCO[2]	IHO[3], IOC[4]	composite	Bathymétrie	m	15'' (≃450m)	-
MUR SST[5]	NASA	satellitaire	Température des eaux de surface des océans	K	0.01° x 0.01° (≃1km)	2002 - présent
Ocean Colour[6]	Copernicus Mercator	satellitaire	Concentration en Chlorophylle a	mg/m^3	0.083° x 0.083° (≃4km)	1993 - 2020
FSLE[7]	Aviso+ Satellite Altimetry Data	satellitaire	Taux de Séparation des Trajectoires de Particules initialement proches		0.04° x 0.04°	1994 - présent
Global Multiyear Biogeochemical[8]	Marine Copernicus	Simulation numérique	[Chla], $[NO_3]$, $[PO_4]$, [Si], $[O_2]$, [Fe]	$mmol/ m^3$	0.25° x 0.25°	1993 - 2020

Les exposants de Lyapunov à taille finie (FSLE) sont un outil mathématique définis par Aurell en 1997 mesurant le taux de séparation des trajectoires de particules initialement proches

[2] https://www.gebco.net
[3] Organisation hydrographique internationale
[4] Commission océanographique intergouvernementale
[5] Multi-Scale Ultra High Resolution Sea Surface Temperature. https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1
[6] https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/OCEANCOLOUR_GLO_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_082/INFORMATION
[7] Exposant de Lyapunov à Taille Finie. https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/fsle-finite-size-lyapunov-exponents.html
[8] https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029/INFORMATION

dans l'espace. Ils permettent la détection de certaines structures lagrangiennes cohérentes et la description de l'évolution spatio-temporelle de ces structures, notamment les structures tourbillonnaires. La technique des FSLE est adaptée aux applications océanographiques, étant l'analogue mathématique d'une expérience de flotteurs : un ensemble de traceurs avec certaines distances mutuelles initiales (D'Ovidio 2004).

2.3. Jeux de paramètres considérés pour les découpages

Trois jeux de paramètres différents ont été définis sur la base d'un compromis entre les variables préconisées dans la littérature, leur disponibilité, leur étendue temporelle et les enjeux de gestion lié au PNMC que nous souhaitions mettre en avant dans le cadre de ces tests :

- JDD-1. Dit « classique », JDD-1 se base sur les trois principales variables communément utilisées en bio-régionalisation (Hobday, 2011; Reygondeau, 2017). En 2007, Snelder identifie 8 variables à partir d'une vingtaine de régionalisations différentes. Il les classe pas ordre d'importance dans le cas d'une bio-régionalisation pélagique et épipélagique : les deux premières citées sont la bathymétrie et la SST, puis la concentration en chlorophylle.

- JDD-2 intègre la composante dynamique FSLE afin d'investiguer comment l'ajout d'un paramètre influence le clustering par rapport à JDD-1 comme le présentait Nieblas dans son étude (2014).

- JDD-3 utilise les concentrations de surface en chlorophylle, nitrates, phosphates, silice, oxygène dissous et fer modélisées dans un modèle global (à l'échelle de la planète), dans le but de confronter les deux premières classifications à un découpage basé sur un jeu de paramètres exclusivement biogéochimique.

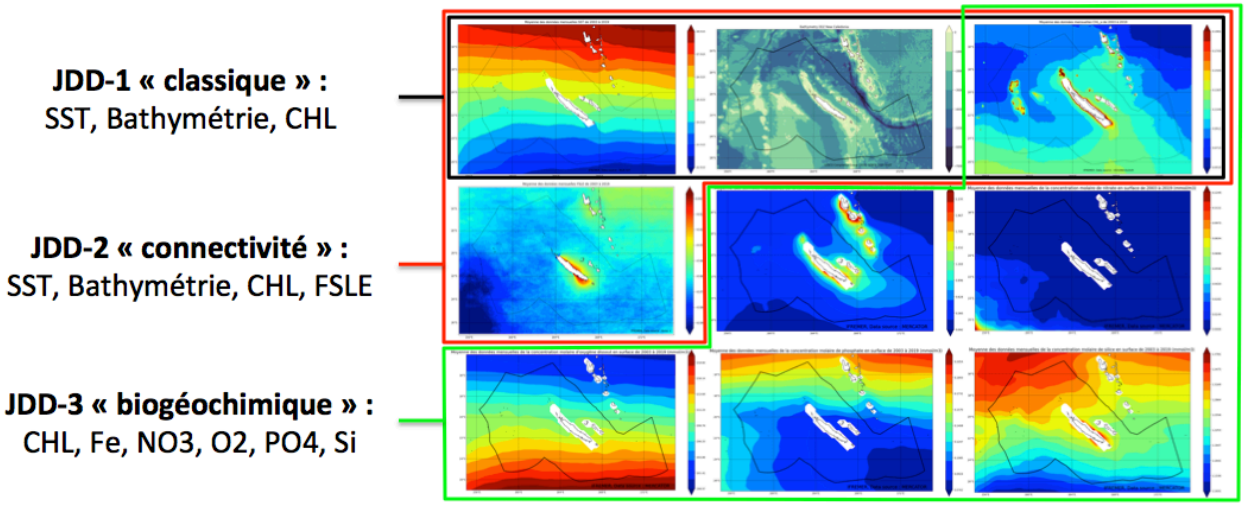


Figure 5. Récapitulatif des jeux de paramètres utilisés pour la classification de l'espace marin de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

La moyenne temporelle de chaque variable a été calculée sur l'ensemble de la période 2003-2019 et pour une emprise allant de -14°N à -23°N et de 155°E à 175°E, qui englobe la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. Les données, qui peuvent être de résolutions spatiales différentes (Tableau 1) ont été réinterpolées sur une grille commune de résolution 4 km. A noter que les données de chlorophylle-a et de bathymétrie ont été considérées par leur logarithme du fait de l'amplitude importante des valeurs.

2.4. Méthode de classification

Le but de la classification est de former des regroupements de façon à minimiser la variabilité intragroupe (les individus au sein d'un groupe sont le plus semblable possible), et maximiser la variabilité intergroupes (les individus appartenant à des groupes différents se démarquent le plus possible). Appliquée au découpage de l'espace marin, la classification revient à discriminer les masses d'eau en fonction de leurs paramètres physiques et/ou biologiques. Chaque individu est une zone, ici un « pixel », qui contient les données du jeu de paramètres en cours d'analyse, par exemple SST, Chl et bathymétrie (JDD-1).

L'application des méthodes d'apprentissage non supervisées pour la classification de la surface des océans a été initiée au début des années 2000 (Krug et al., 2017). De nombreuses méthodes de classifications sont présentes dans la littérature. D'après les travaux d'Oliver et al. 2004, les algorithmes les plus performants pour répondre à des problématiques d'identification de masse d'eaux sont les algorithmes de classification divisés comme par exemple les algorithmes de K-means (MacQueen, 1967) et le C fuzzy means. La principale différence entre ces deux algorithmes est le degré d'appartenance des individus à leur classe. Alors que le K-means accorde la même crédibilité aux individus d'une même classe, l'algorithme C fuzzy means distingue le degré d'appartenance des individus d'une classe en fonction de leur éloignement par rapport au centre de la classe. Par sa littérature plus riche et afin de simplifier l'intégration des résultats dans les politiques de gestion du PNMC, la méthode de classification retenue dans notre étude est celle du K-means.

2.4.1. K-means

La méthode des K-means nécessite en entrée le nombre de groupes. Il convient donc de le déterminer en amont (cf. Section 2.4.2). L'algorithme K-means va affecter chaque individu (pixel) à un groupe de manière itérative et de sorte à minimiser l'inertie intra-classes, i.e. la dispersion à l'intérieur de chaque groupe. Cet indicateur de compacité des classes est défini comme suit :

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k} d^2(i, G_k) \qquad \text{où} \quad d(i, G_k) = ||i - \mu_{G_k}||$$

avec K le nombre de groupes, n le nombre d'individus donné dans un groupe k, d la mesure de distance, G un groupe k, i un individu et μ_{G_k} le barycentre des points du groupe G_k.

Les individus peuvent être réalloués à d'autres groupes au cours des itérations. L'algorithme se termine lorsqu'il y a convergence, i.e. que l'inertie intra-classes ne diminue plus ou que les individus ne changent plus de classe. Il est important de noter que la solution de convergence de l'algorithme K-means dépend de son point de départ, l'initialisation choisissant le centre des groupes en prenant des individus au hasard. L'inconvénient d'une attribution au hasard du centre des classes lors de l'initialisation est que si l'individu choisi comme centre est un point trop éloigné du reste des individus, aucun autre individu ne lui sera associé. Inversement, si deux centres sont trop similaires ils seront intégrés dans le même groupe. Ces deux cas entrainent des mauvais regroupements, l'algorithme K-means++ a été développé afin de résoudre ce problème. L'algorithme K-means++ utilisé ici sera celui développé dans la librairie scikit-learn de Python.

2.4.2. Détermination du nombre de groupes

Une difficulté majeure de l'analyse en groupe via un algorithme de classification non hiérarchique est de déterminer le nombre de groupes k en amont. Deux méthodes ont été utilisées

dans cette étude pour déterminer k, chacune basée sur un indicateur (l'inertie d'une part, et l'indice de silhouette d'autre part). Dans les deux cas, l'objectif est d'optimiser l'indicateur, qui dépend du nombre de groupes. Ainsi, pour chaque jeu de données, nous avons lancé l'algorithme de clustering successivement en faisant varier à chaque fois le nombre de groupe k de 2 à 15. Le nombre de groupe k a été déterminé par rapport à la valeur optimale de l'indicateur.

- l'inertie (intra-classe) est définie comme la somme quadratique des distances entre un point et le centroïde du groupe le plus proche (cf. formule 2.4.1). Plus le nombre de groupe augmente, plus la valeur de l'inertie diminue. Selon cette approche, la valeur de k est déterminée comme le point de plus grande courbure, ce qui signifie que l'ajout d'un groupe n'apporte pas significativement d'information supplémentaire.

- l'indice de silhouette est quant-à-lui défini comme la mesure de la similarité d'un objet avec son propre groupe par rapport aux autres groupes. Il est défini par (Rousseeuw, 1987) :

$$SIL = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} SIL(i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)}$$

où SIL est la silhouette totale, $SIL(i)$ la silhouette de chaque individu, a le terme de compacité et b le terme de séparabilité

La compacité a_i se définit comme la distance moyenne de l'objet i par rapport aux objets de son groupe :

$$a_i = \frac{1}{n_k - 1}\sum_{j=1}^{n_k} d(i,j)$$

où n_k est le groupe k dans lequel est l'individu i, d la distance et j les autres individus qui composent le grouple dans lequel se trouve l'individu i

La séparabilité b_i se définit comme le minimum des distances moyennes de l'objet i aux objets de chacune des autres classes :

$$b_i = \min_{G_{k'} \neq G_k} \left\{ \frac{1}{n_{k'}} \sum_{j=1}^{n_{k'}} d(i,j) \right\}$$

où $G_{k'}$ sont les groupes différents de G_k , $n_{k'}$ le nombre d'individus du groupe $G_{k'}$

L'indice de silhouette prend des valeurs comprises entre -1 et +1, une valeur élevée indique que l'objet est bien intégré à son propre groupe et mal « assorti » aux groupes voisins. Si la plupart des objets ont une valeur élevée, alors la configuration du groupe est appropriée. Si de nombreux points ont une valeur faible ou négative, alors le nombre de groupes n'est pas optimal.

2.4.3. Stabilité des frontières

Les paramètres physiques et biogéochimiques sont dynamiques et varient donc temporellement aux échelles horaires, journalières, mensuelles ou annuelles. Le découpage des masses d'eau est dépendant de la valeur de ces paramètres, il est donc directement dépendant de la temporalité des données utilisées. Analyser le découpage spatial des groupes en fonction du temps (mensuellement) permet de mettre en évidence la qualité du clustering. En effet, la stabilité des frontières dans le temps garantit à la fois l'homogénéité du groupe mais aussi sa différence avec les autres. Cette analyse est essentielle à la validation du découpage de l'espace marin car elle rend compte de sa cohérence et de sa stabilité.

La quantification de la stabilité des frontières, basée sur la méthodologie utilisée par Nieblas (2014), correspond au pourcentage de fois où un pixel est considéré comme une bordure. La notion de bordure est définie comme un pixel dont les pixels voisins appartiennent à un groupe différent (Fig. 6).

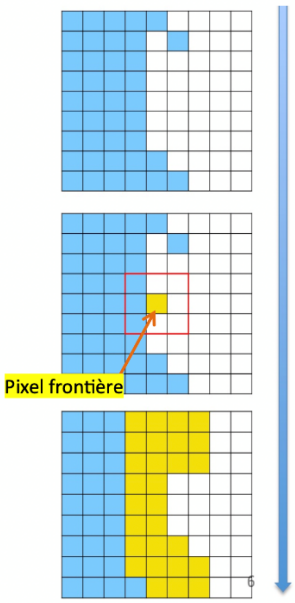


Figure 6: Critère de détermination des bordures : les pixels en bleu et blanc appartiennent respectivement à deux groupes différents ; en jaune il s'agit d'un pixel frontière.

Ainsi, après avoir évalué le nombre optimal de groupe K (cf 3.1), le clustering a été réalisé pour chaque mois de 2003 à 2019 (exemple Figure 7, figure de gauche). Pour chaque classification, les frontières ont été déterminées grâce à la méthode illustrée en Figure 6 (exemple Figure 7, figure de droite). Enfin, le pourcentage de fois où un pixel est apparu comme bordure a été calculé, en résulte une matrice de stabilité du clustering (Figure 9).

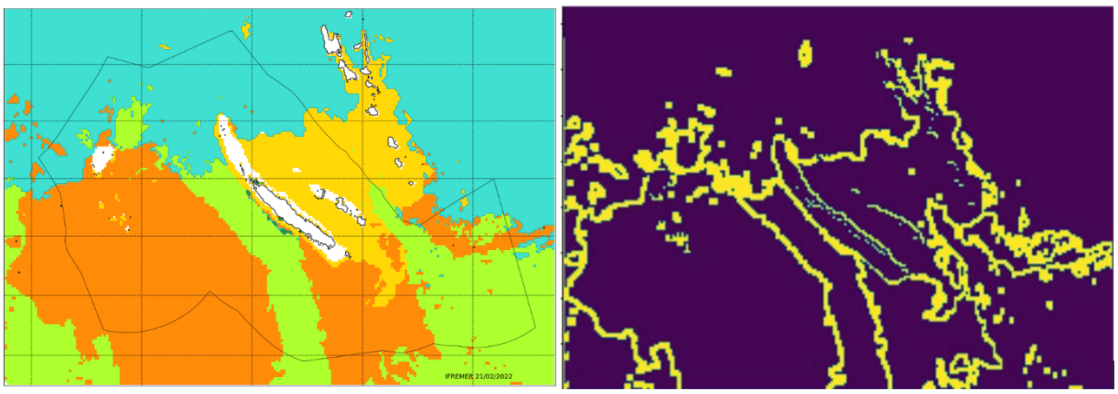


Figure 7 : Illustration du processus de détermination de frontière à partir de l'exemple du découpage de janvier 2003 pour le JDD-1. A gauche la figure représente le découpage obtenu pour janvier 2003 et à droite, il s'agit des frontières déduites de la figure gauche.

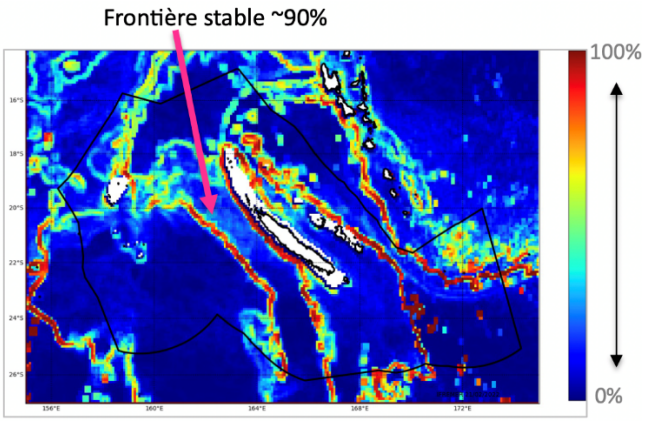
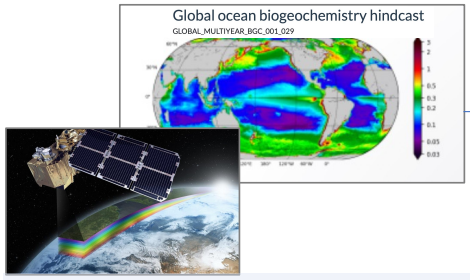


Figure 8 : Carte représentant la stabilité des frontières établie pour le JDD-1 "classique".

2.5. Workflow

La figure ci-dessous récapitule le flux opérationnel de notre méthodologie du découpage de l'espace marin en masses d'eaux homogènes. Ce traitement a été réalisé pour les trois jeux de paramètres (JDD-1, JDD-2, et JDD-3).



Récupération des données satellite et modèle

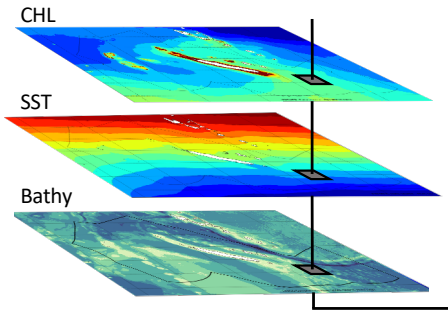
Choix des variables constituants les jeux de donnés

Traitement des données :

- Masquage et recadrage des données

- Calcul des moyennes globales
- Normalisation

$$\frac{1}{n}\sum_{i=2003}^{2019} x_i$$

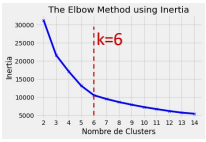


Chaque pixel est considéré comme un individu avec 3 caractéristiques : sst, bathy, chl

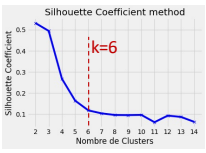
Matrice de données créée pour tous les pixels

PIXEL	SST	BATHY	CHL
1	24,93	6,343	0,453
2	27,02	3,221	0,983
3	25,34	3,092	0,015

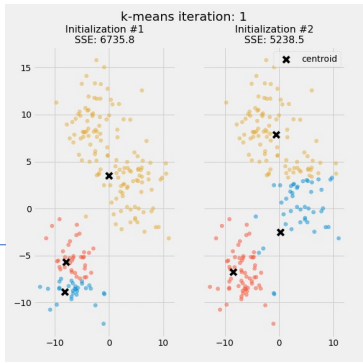
Classification regroupant les pixels ayant des propriétés similaires



Détermination du nombre de groupe k



Clustering (complexité :)



Régionalisation finale

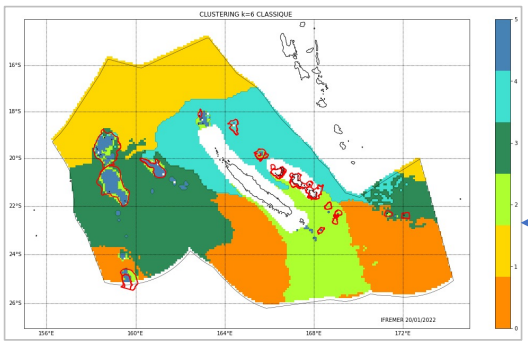


Figure 9 : Workflow détaillant la méthode de classification mise en place. La méthode est illustrée dans le cas particulier du découpage du PNMC avec le jeu de données classique JDD-1.

3. RESULTATS

3.1. Moyenne et écart-type des données sur la période 2003-2019

Les moyennes et les écart-types de chaque variable (exceptée la bathymétrie, fixe) ont été calculés pour la période 2003-2019, les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous.

3.1.1. Température de l'eau en surface

Un gradient thermique sud-nord très marqué caractérise la zone d'étude, signature de la variation de la latitude de l'hémisphère Sud avec des températures moyennes allant de 22°C à 29°C.

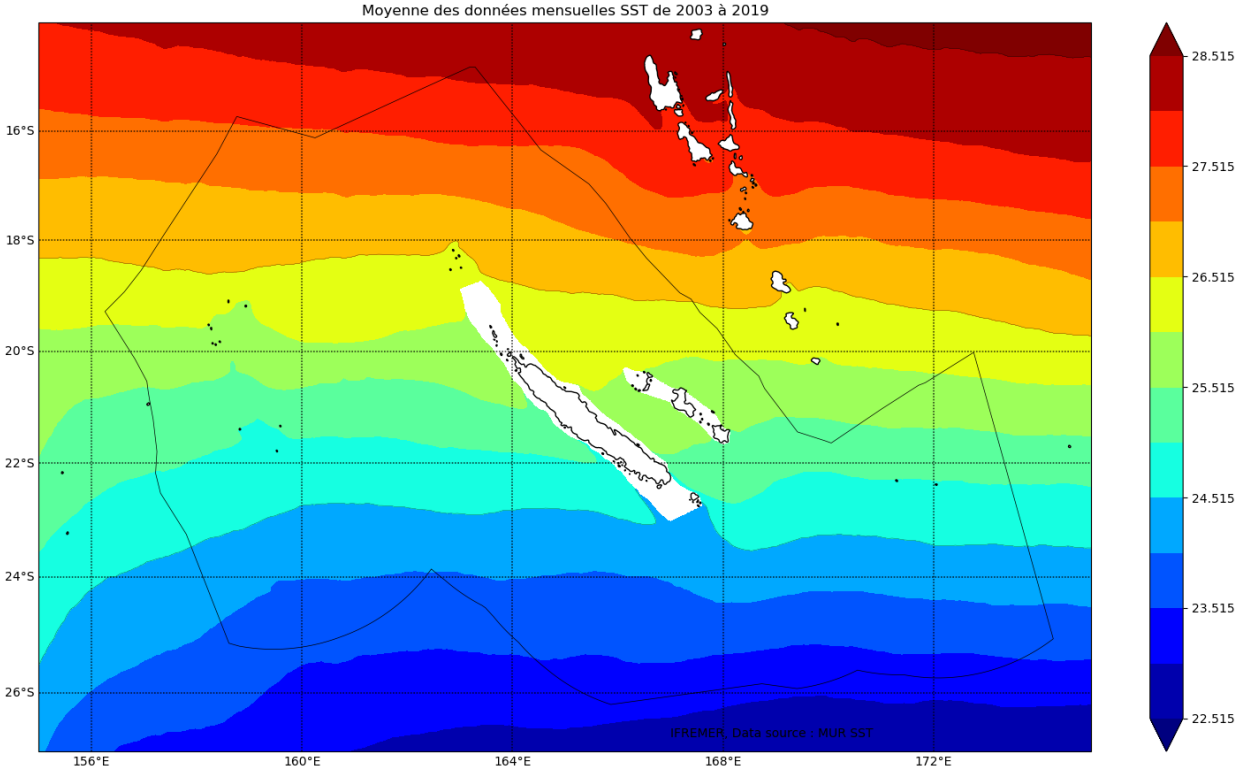


Figure 10 : Moyenne des données mensuelles de la température surface de l'eau en degré °C de 2003 à 2019.

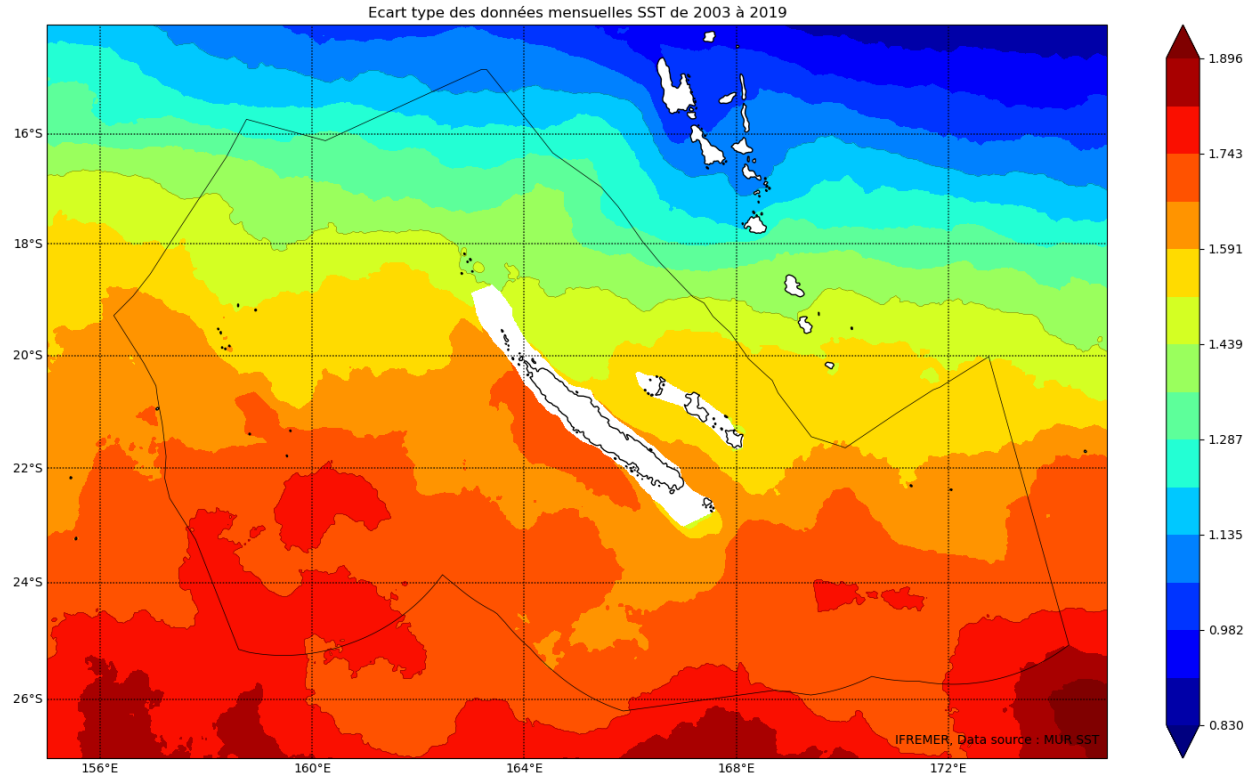


Figure 11 : Écart-type des données mensuelles de la température surface de l'eau en degré °C de 2003 à 2019.

3.1.2. Chlorophylle-a en surface

Les concentrations maximales de chlorophylle-*a* en surface sont situées aux abords des îles et au niveau des plateaux de Chesterfield et Bellona situés à l'ouest de la Grande Terre. La concentration de chlorophylle-a permet d'estimer la biomasse de phytoplancton présente, elle-même dépendante de la présence en nutriments, naturellement plus importante le long des côtes.

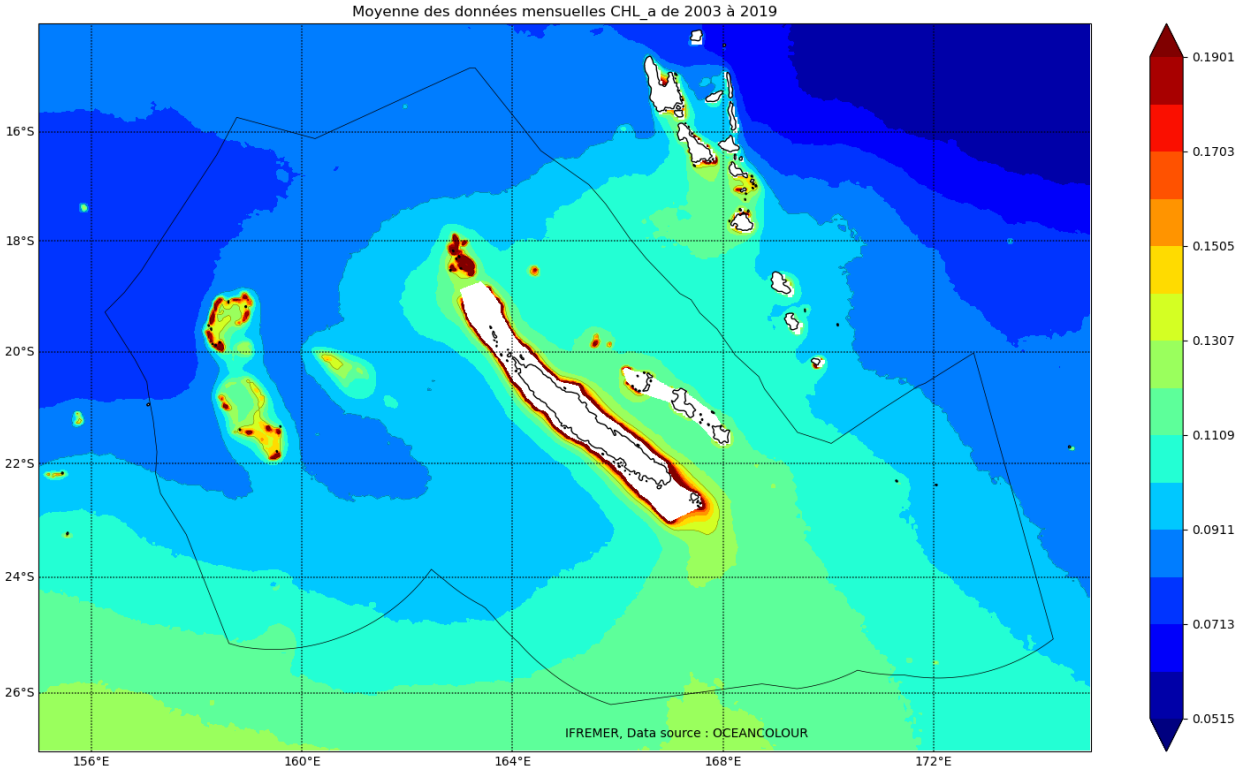


Figure 12 : Moyenne des données mensuelles de chlorophylle-a en mg/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

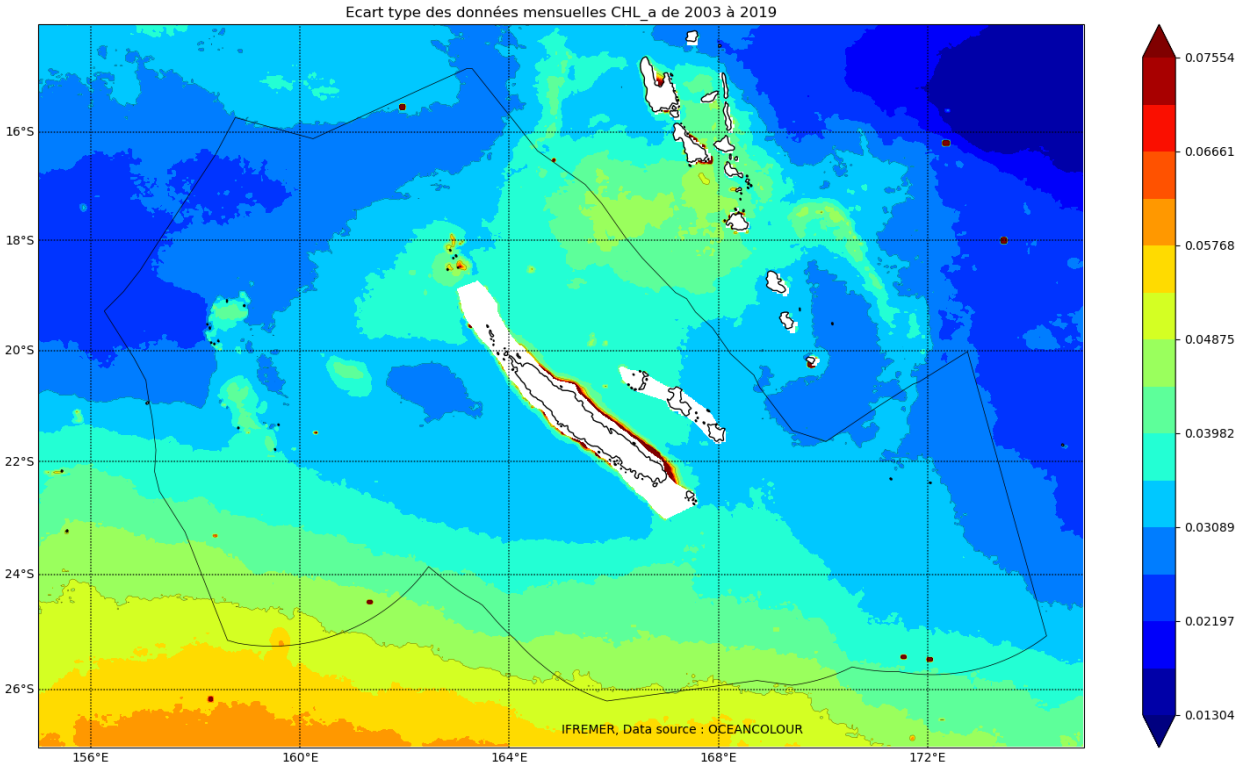


Figure 13 : Écart-type des données mensuelles de chlorophylle-a en mg/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.3. FSLE

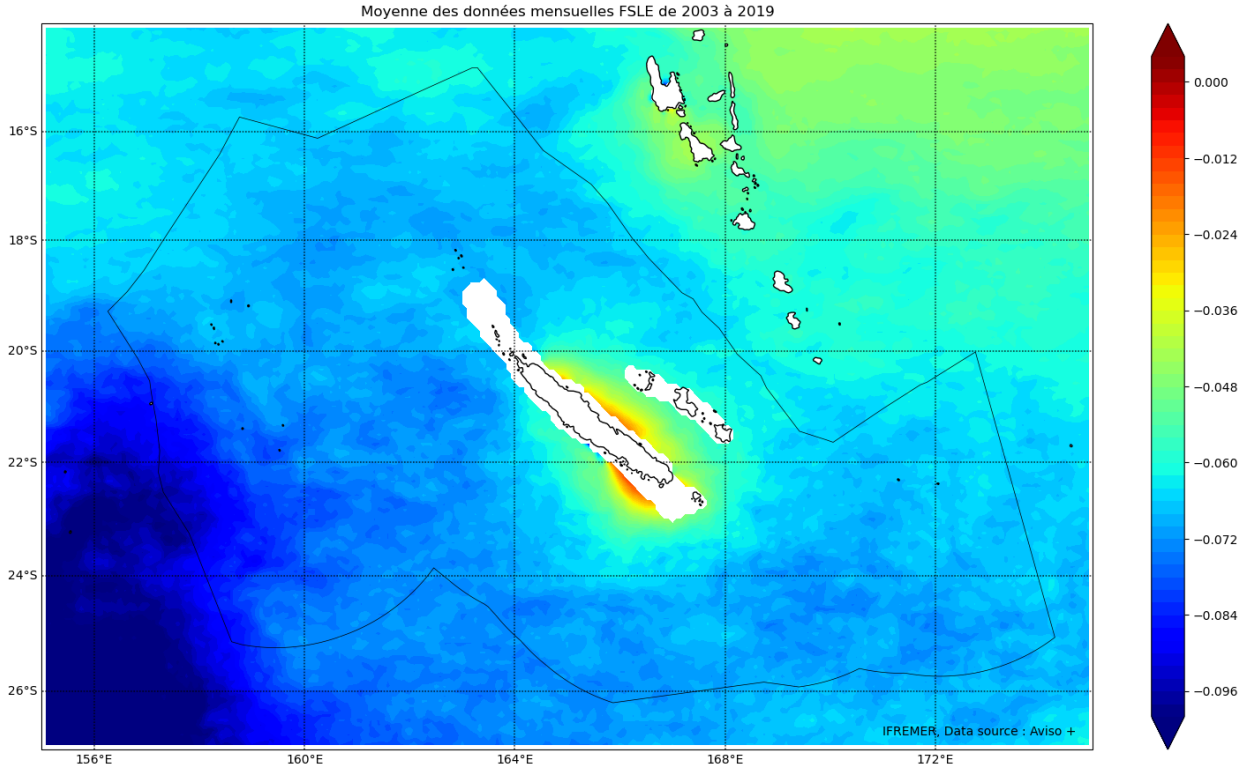


Figure 14. Moyenne des données mensuelles de FSLE de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

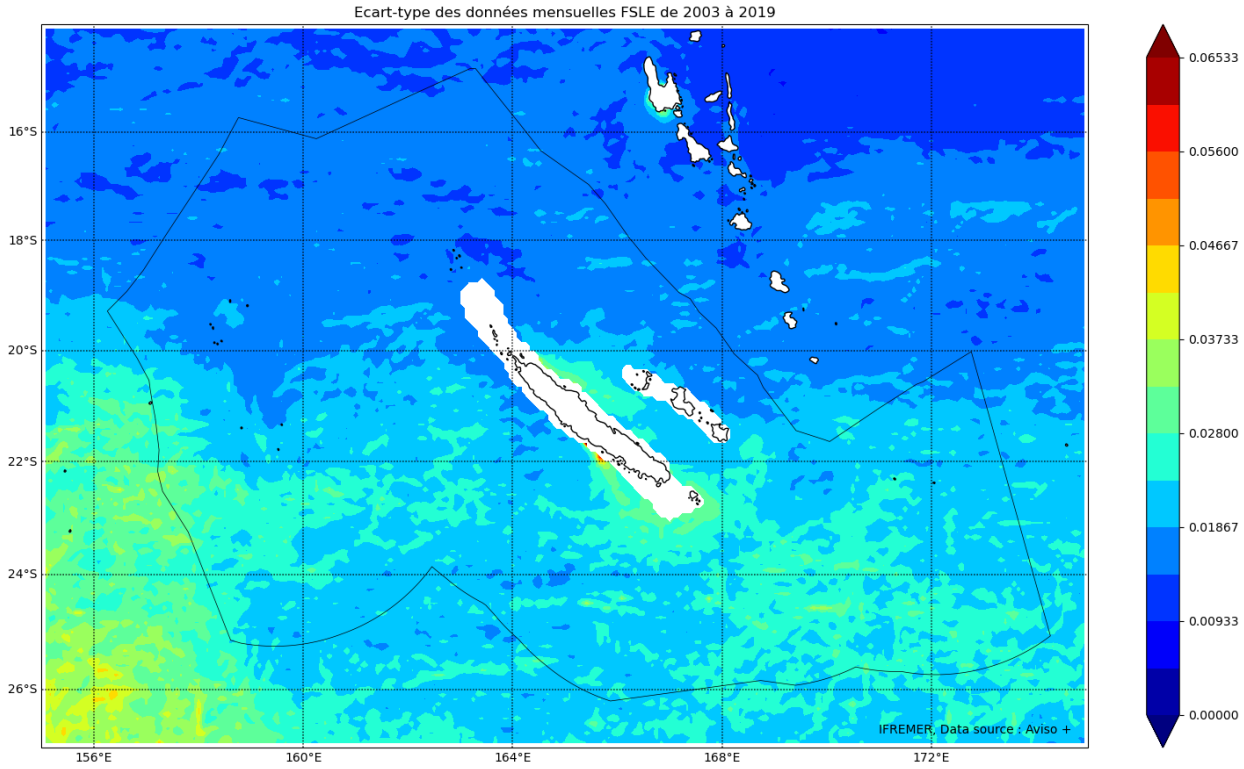


Figure 15. Écart-type des données mensuelles de FSLE de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.4. Fer dissous en surface

Le fer dissous est issu des apports terrigènes, les concentrations maximales de fer dissous en surface sont donc logiquement présentes en plus grande quantité au niveau des côtes des îles hautes. L'écart type de concentrations en fer dissous est plus important aux abords des îles hautes car les apports terrigènes sont dépendants des phénomènes météorologiques, très variables.

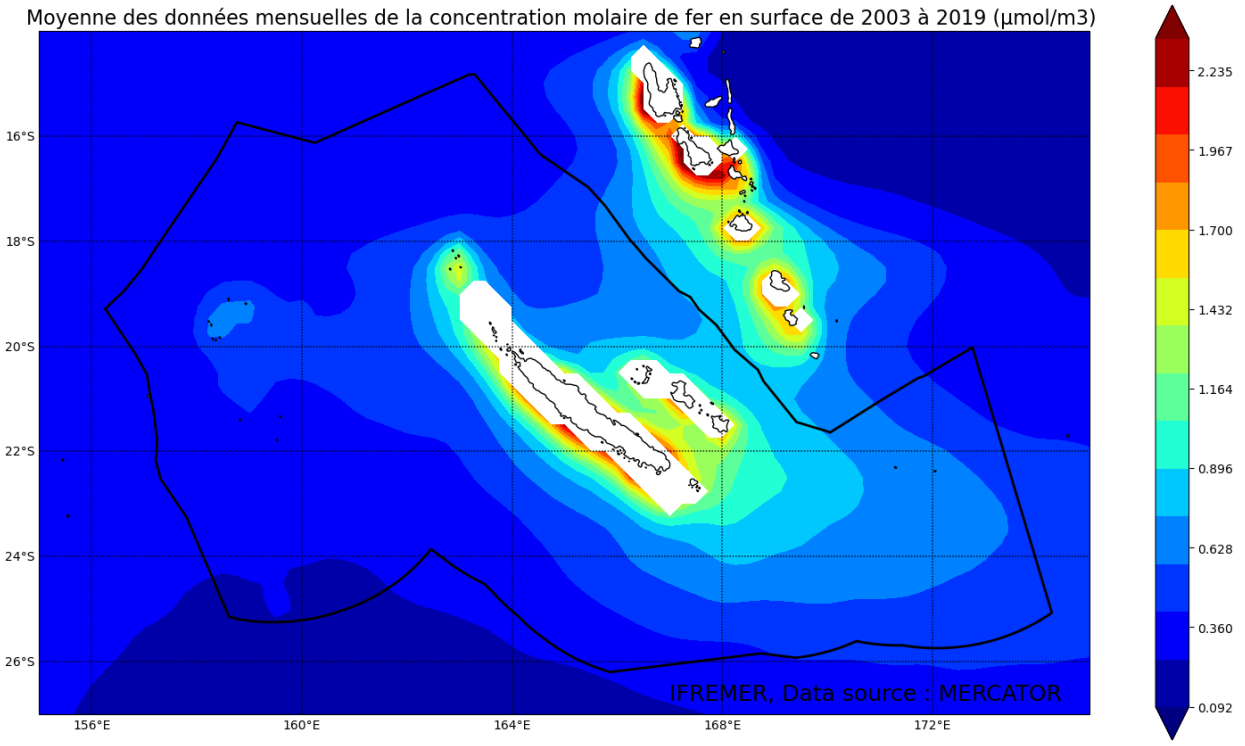


Figure 16. Moyenne des données mensuelles de fer dissous en surface en µmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

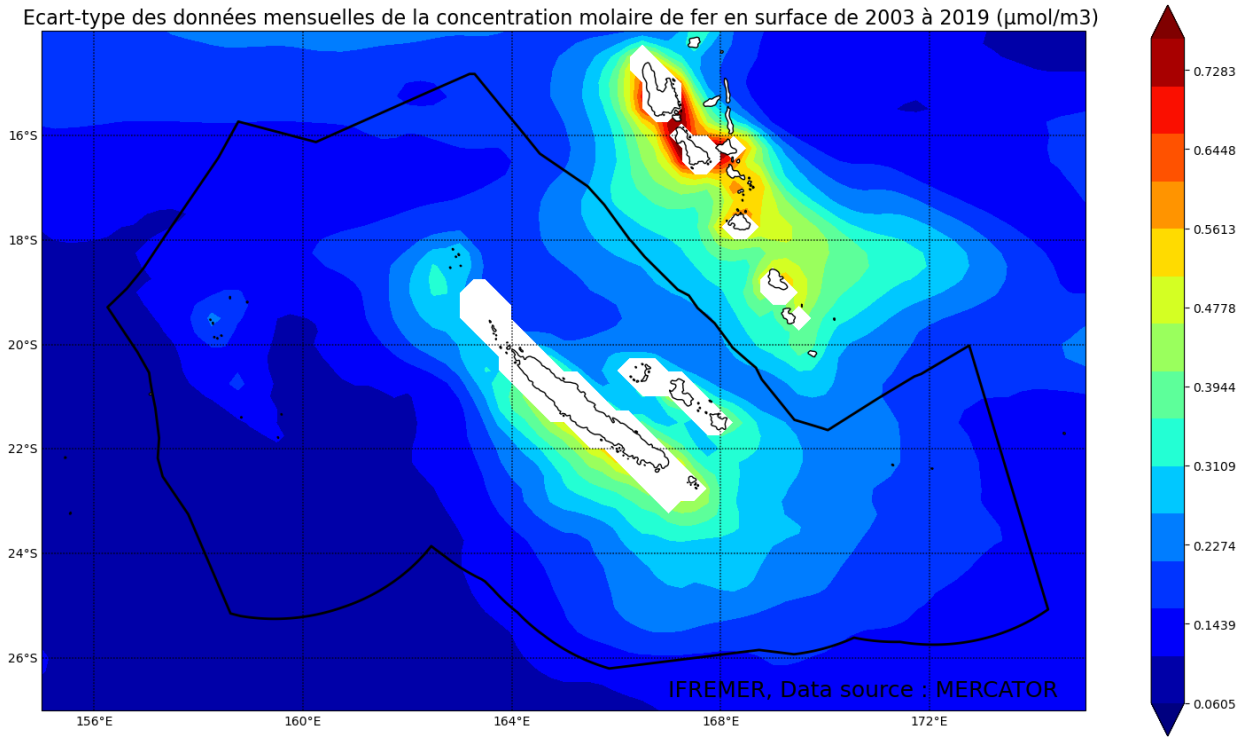


Figure 17. Écart-type des données mensuelles de fer dissous en surface en µmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.5. Silice dissous en surface

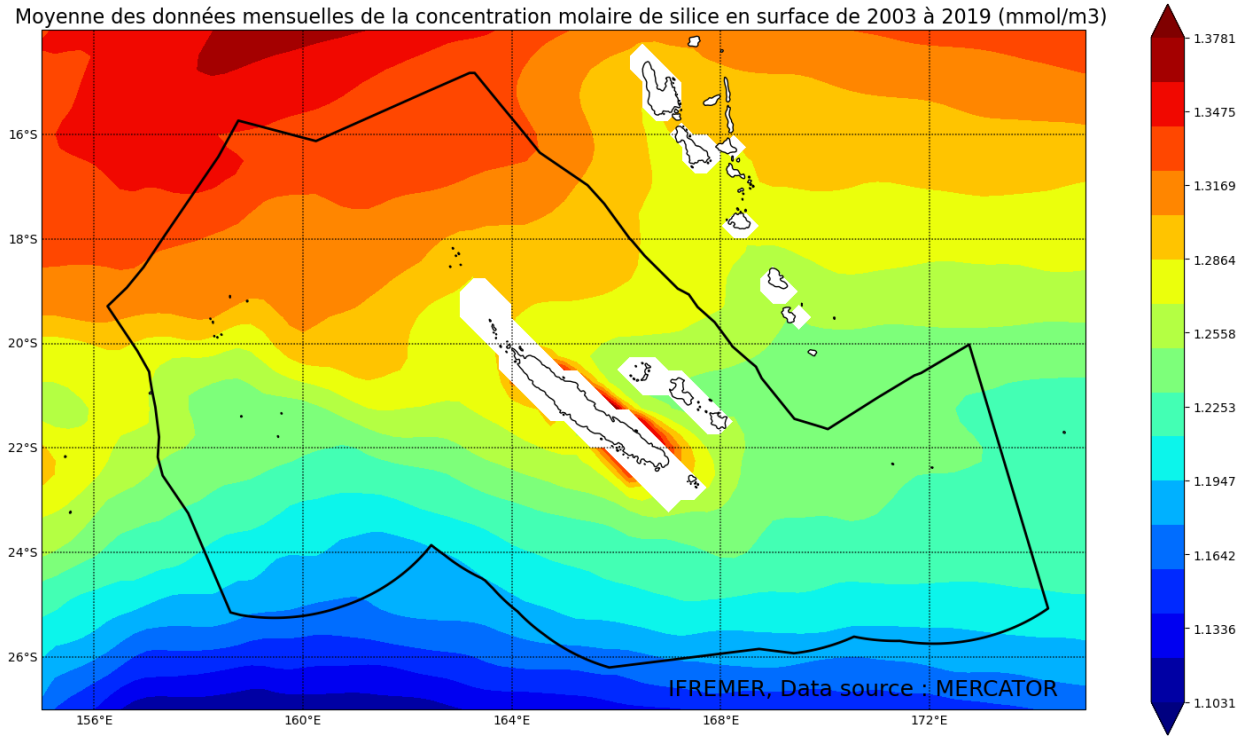


Figure 18. Moyenne des données mensuelles de silice dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

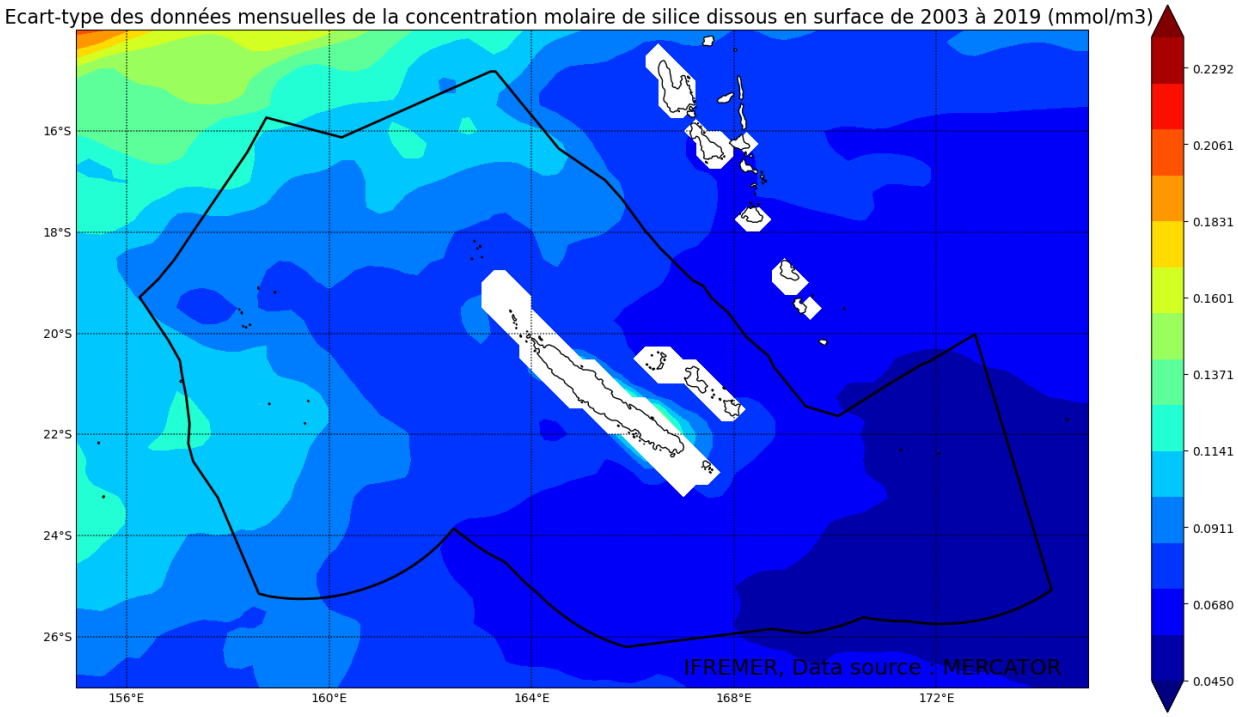


Figure 19. Écart-type des données mensuelles de silice dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.6. Nitrate dissous en surface

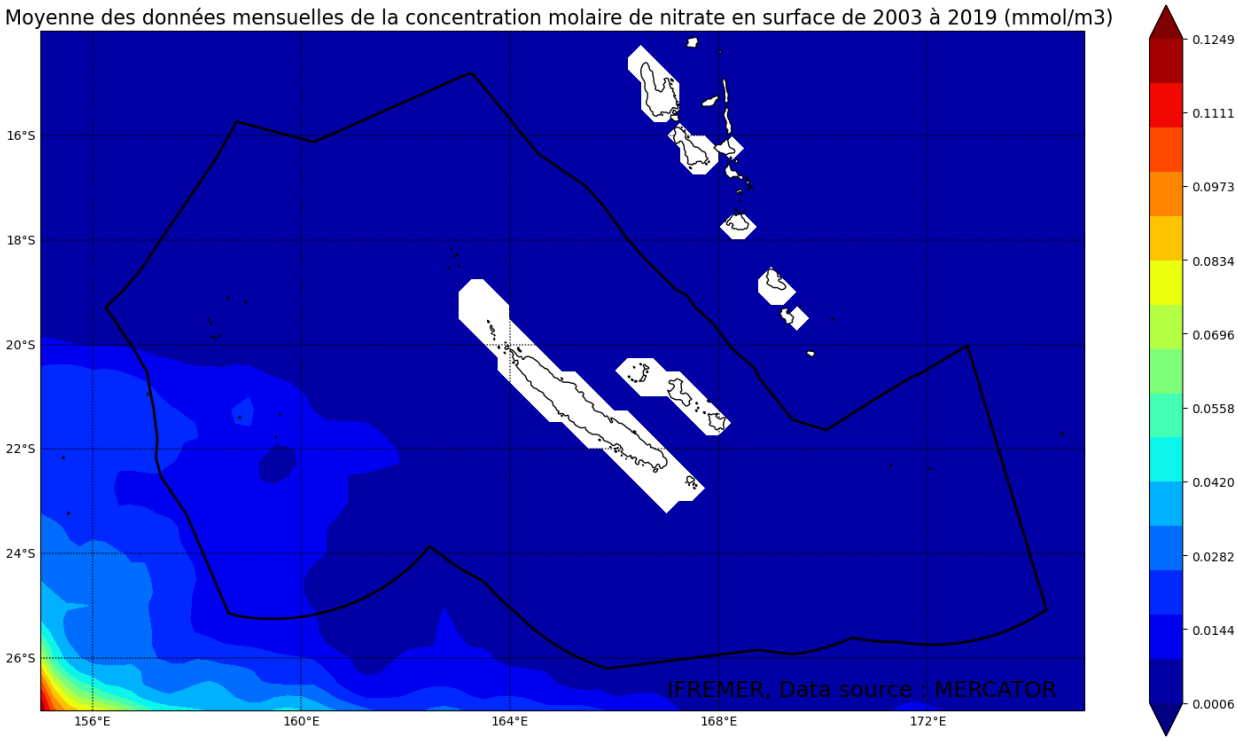


Figure 20. Moyenne des données mensuelles de nitrate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

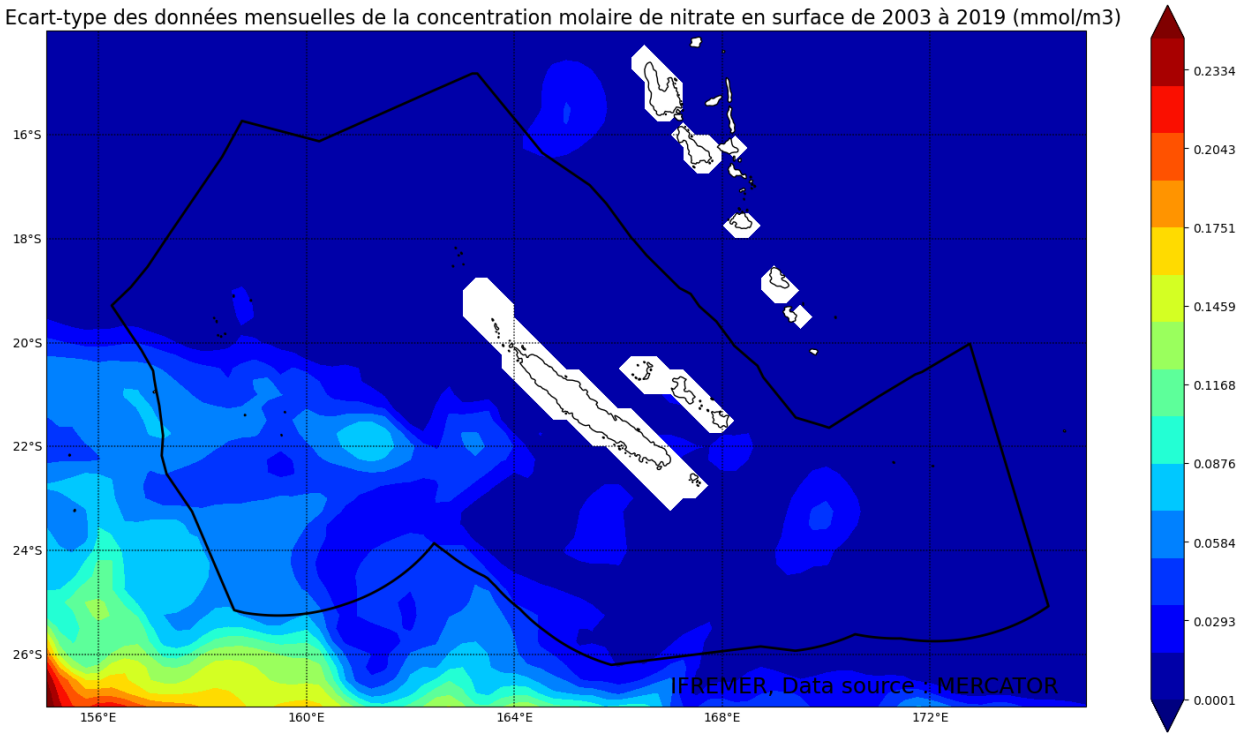


Figure 21. Écart-type des données mensuelles de nitrate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.7. Phosphate dissous en surface

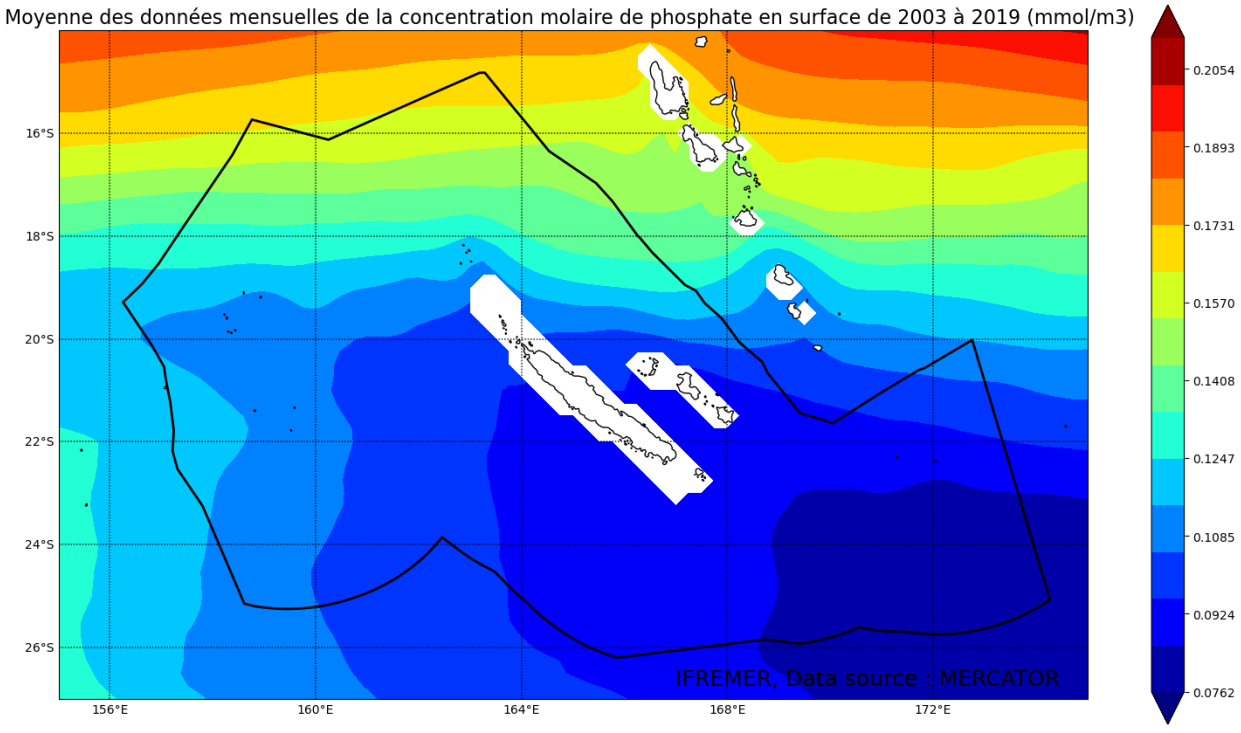


Figure 22. Moyenne des données mensuelles de phosphate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

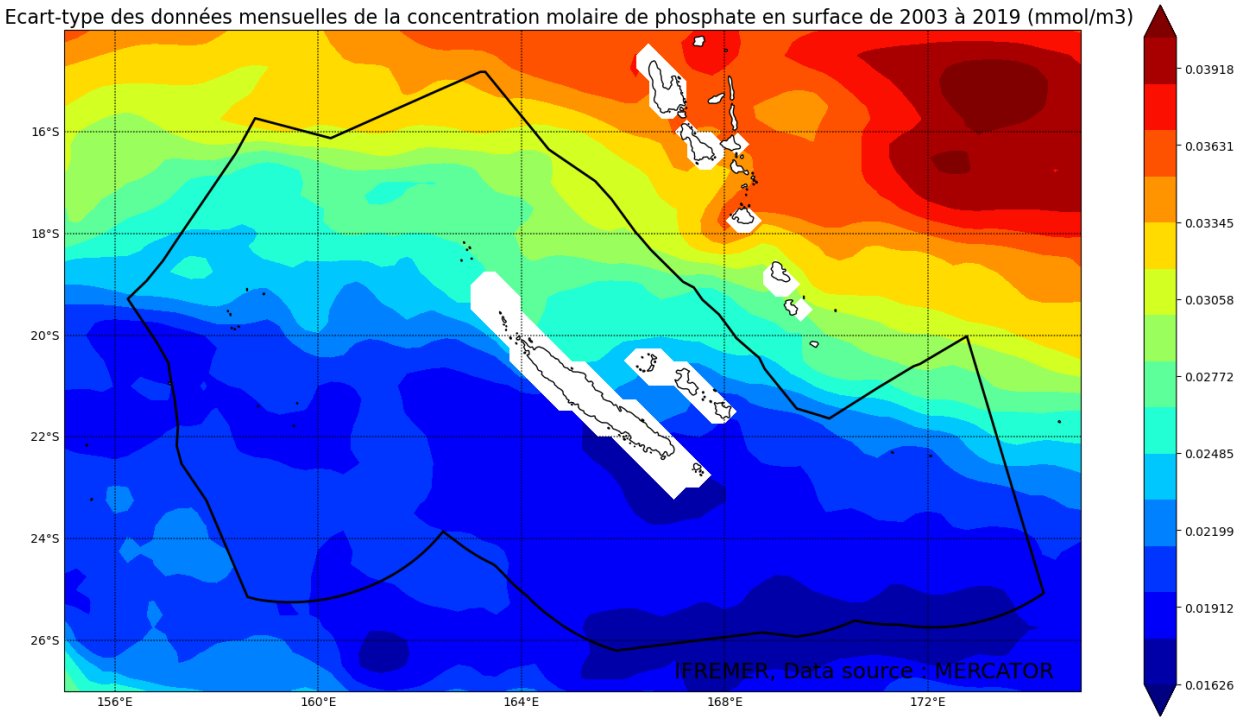


Figure 23. Écart-type des données mensuelles de phosphate dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.1.8. Oxygène dissous en surface

Le gradient d'oxygène dissous est de sens opposé vis-à-vis du gradient thermique. Cette opposition s'explique par la baisse de la solubilité de l'oxygène lors de l'augmentation de la température de l'eau.

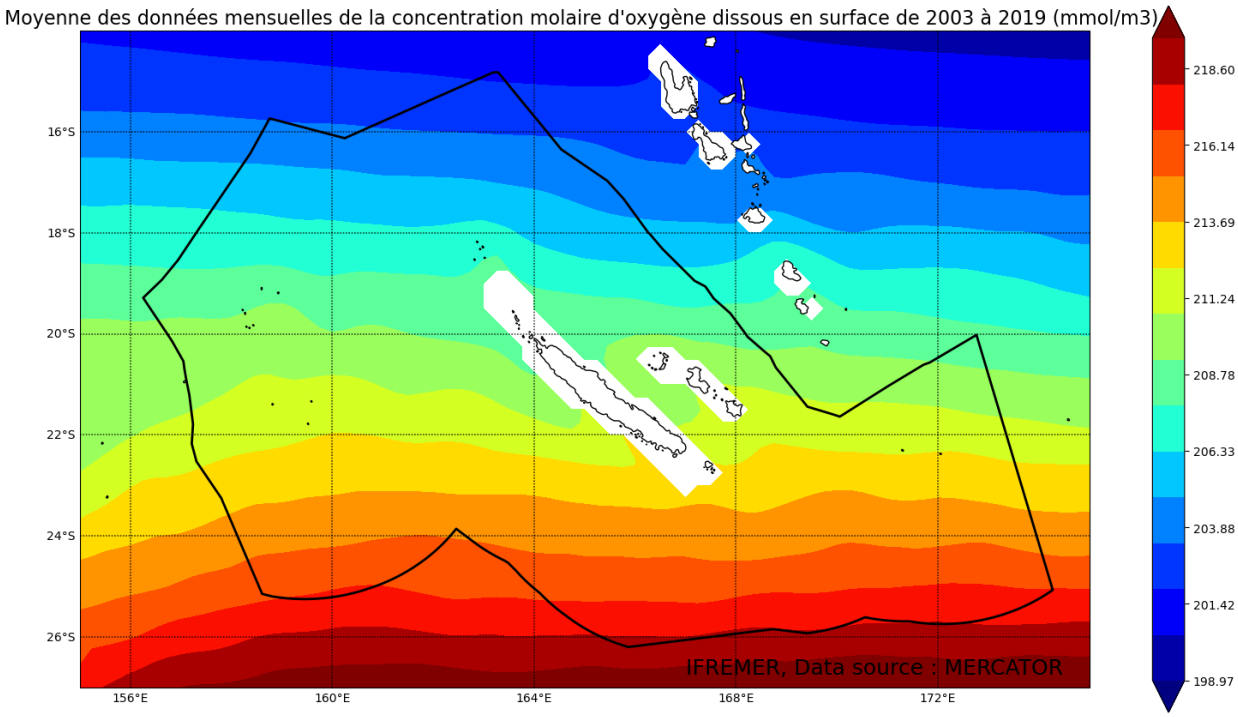


Figure 24. Moyenne des données mensuelles d'oxygène dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

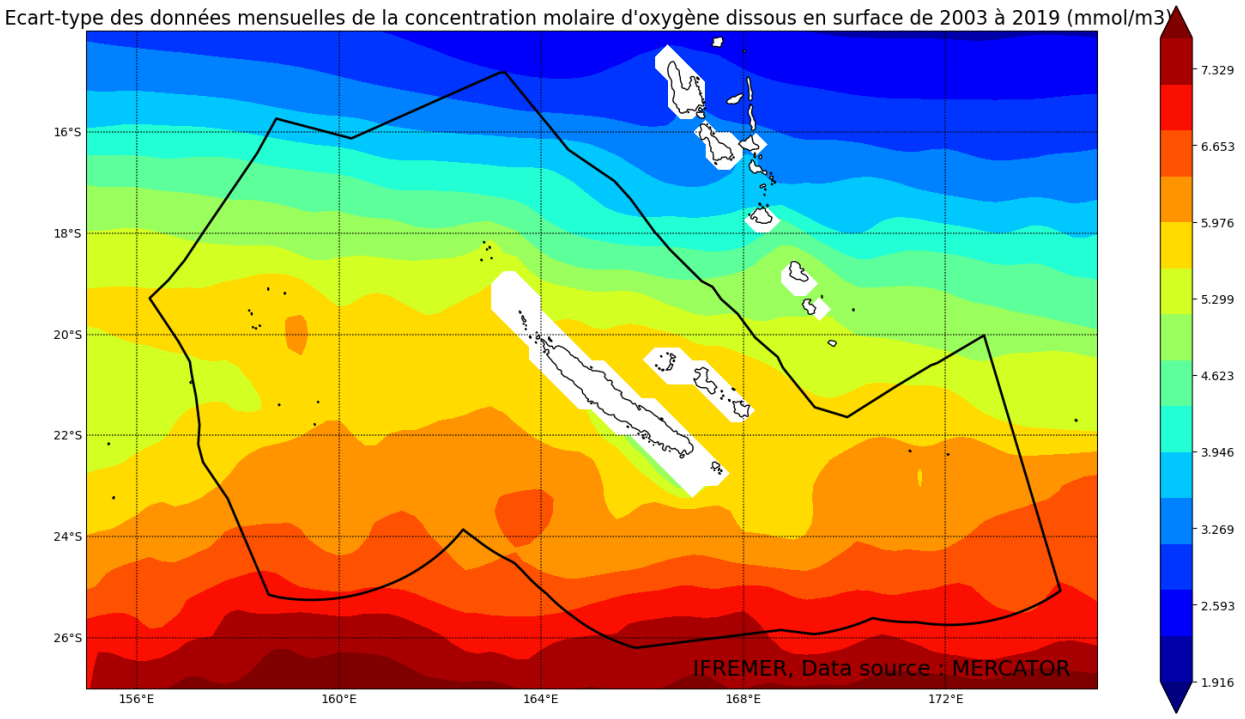
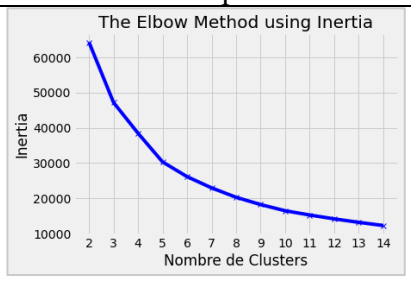
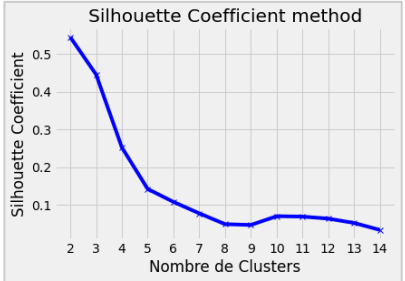
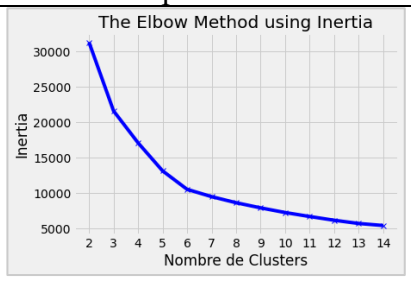
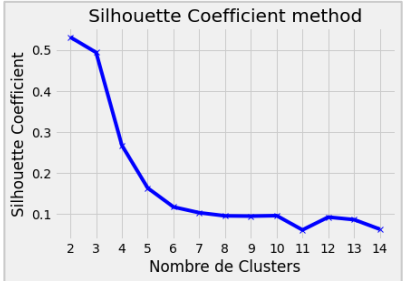


Figure 25. Écart-type des données mensuelles d'oxygène dissous en surface en mmol/m^3 de 2003 à 2019 à l'échelle de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

3.2. Nombre optimal de groupes

Les méthodes de l'inertie intra-classe et de l'indice de silhouette ont permis de déterminer le nombre de groupes optimal pour les trois jeux de paramètres (JDD-1, JDD-2, JDD-3) et pour chacune des emprises (PNMC et emprise étendue), soit un total de six cas de figure. Les courbes d'inertie et d'indice de silhouette en fonction du nombre de clusters sont présentées en Figure 26. Pour chaque courbe, le k optimal a été déterminé de manière qualitative par rapport à l'inflexion de la courbe.

	Emprise étendue	Emprise restreinte au PNMC
JDD1 « Classique »	 → $k = 5$  → $k = 5$ k = 5	 → $k = 6$  → $k = 6$ *ou* 7 k = 6

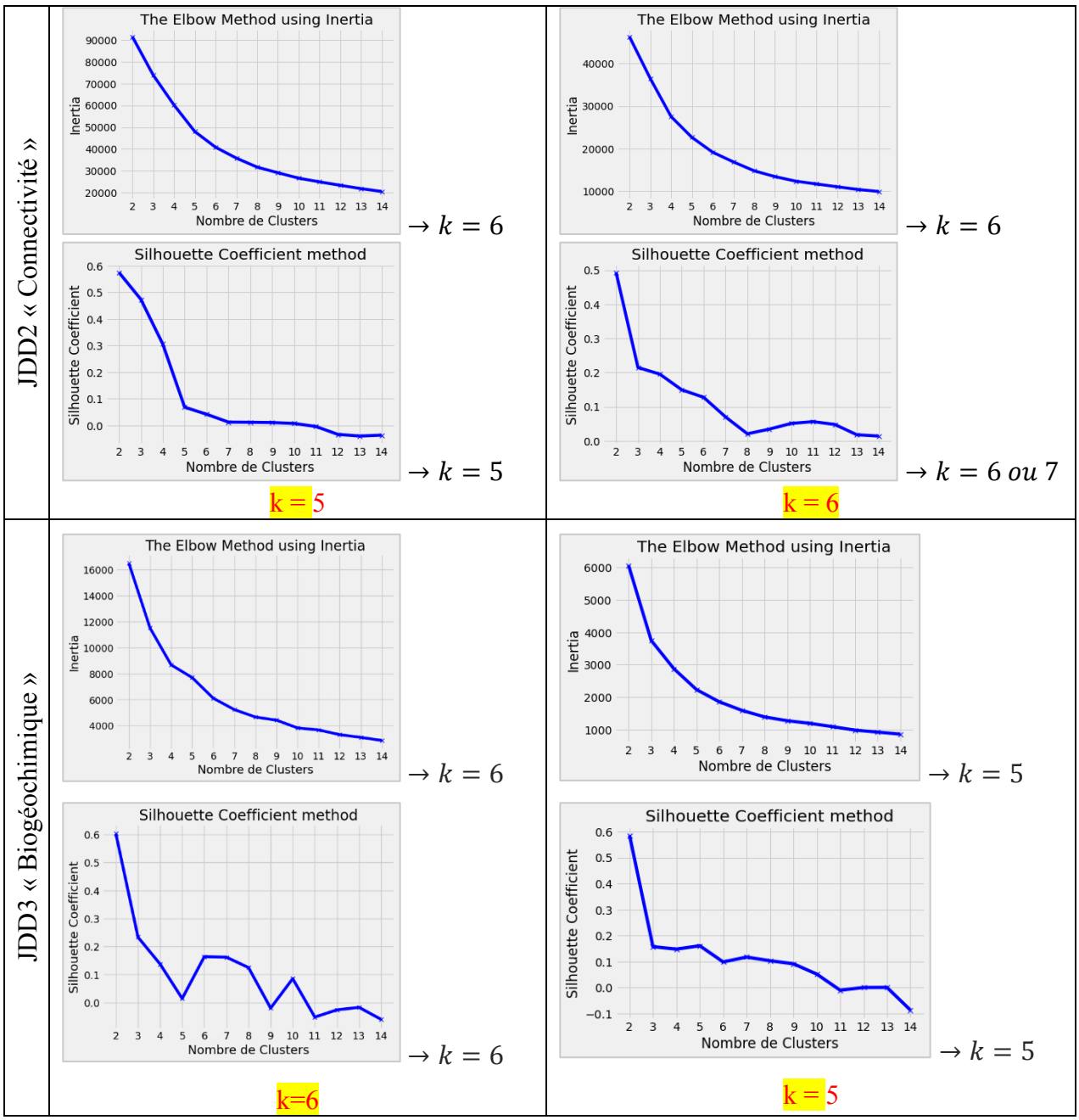


Figure 26 : Détermination du nombre optimal de groupe pour chaque cas de figure. Pour chaque jeu de données, en haut : méthode de l'optimisation de l'inertie ; en bas : méthode de l'indice de silhouette. La valeur de k surlignée représente la valeur définitive choisie, et représente la synthèse des deux méthodes.

Pour le jeu de paramètres comportant les caractéristiques océanographiques classiques (JDD-1) ainsi que pour le jeu de paramètre « connectivité » (JDD-2), le nombre de sous-régions optimal est de 5 quand l'emprise est étendue et 6 lorsque l'emprise est restreinte au PNMC uniquement. A l'inverse, pour le JDD-3, le nombre de groupe optimal pour l'emprise étendue est 6, et celui associé à l'emprise restreinte au PNMC vaut 5. Il est intéressant d'utiliser conjointement les deux méthodes de détermination du k optimal, l'une des méthodes présentant parfois un coude plus marqué que l'autre.

Le nombre de groupe sera donc variable en fonction du jeu de paramètres et de l'emprise considérée (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du nombre de groupe optimal en fonction du découpage considéré.

	Emprise étendue	*Emprise restreinte au PNMC*
JDD-1	5	6
JDD-2	5	6
JDD-3	6	5

3.3. Classification de l'espace marin en régions

Les classifications de l'espace marin en masses d'eau homogènes sont présentées ci-dessous. A noter que chaque classification est indépendante d'une autre et qu'une même couleur ne lie pas entre eux deux groupes issus de classifications différentes.

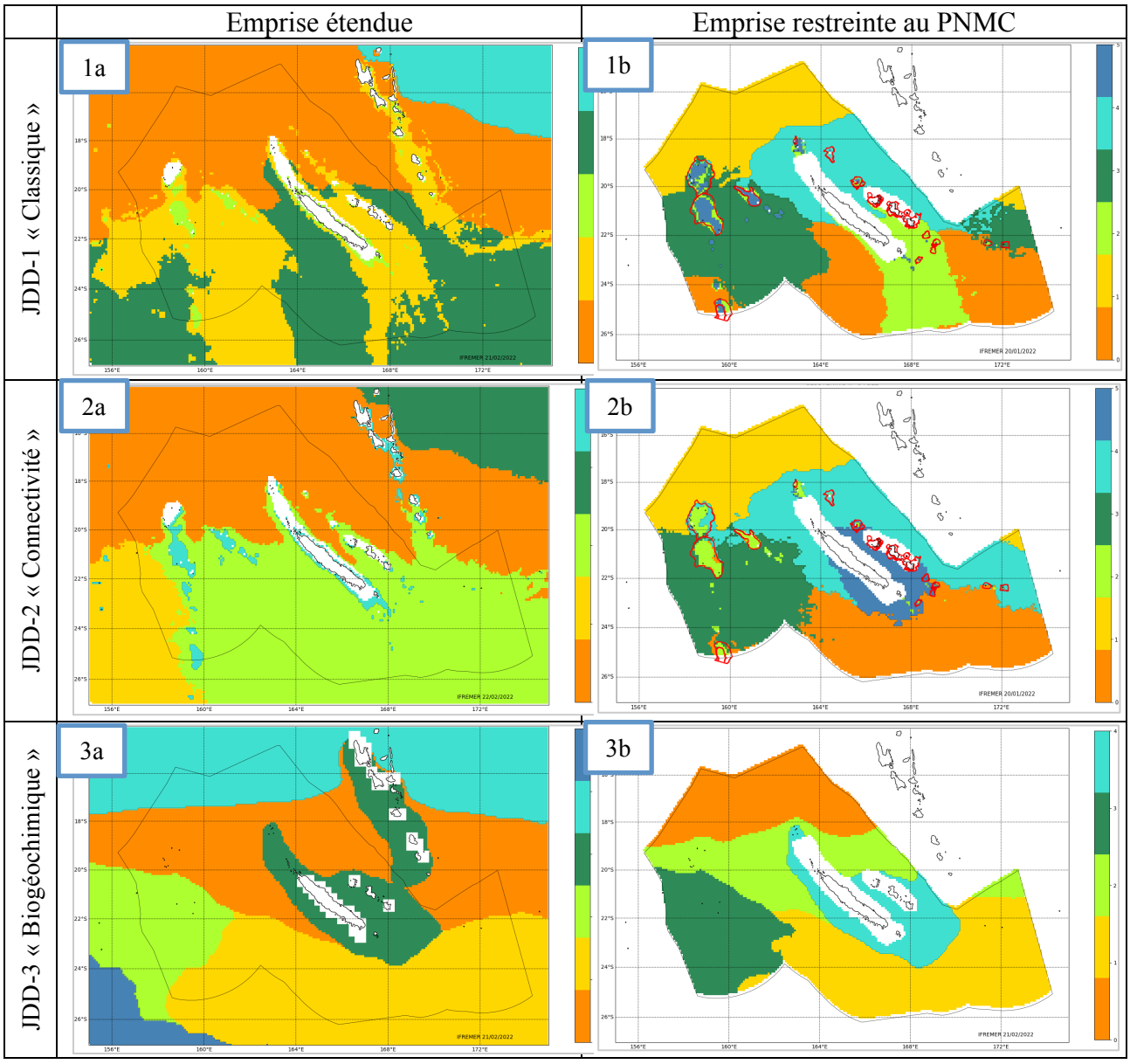


Figure 27 : Classifications de l'espace marin en masses d'eaux homogènes selon le jeu de paramètre et l'emprise considérés.

Visuellement, le découpage spatial est cohérent alors même que la classification ne prend pas directement en compte la localisation des pixels. Néanmoins, le regroupement spatial des pixels traduit les similarités entre les données qui sont influencées par la localisation (rides, bassins pour la bathymétrie, latitudes pour la température, …).

Les moyennes et les écart-types ont été calculées pour chaque variable de chaque groupe et de chaque jeu de paramètres :

Tableau 3 : Moyennes et écart-types des variables environnementales pour chaque groupe (représentés par les couleurs de la Figure 27) de chaque jeu de paramètres. SST : température de surface de l'eau ; Chla : concentration en chlorophylle-a en surface ; FSLE : exposants de Lyapunov à taille finie ; O2 : concentration en oxygène dissous ; Si : concentration en silice ; NO3 : concentration en nitrate ; PO4 : concentration en phosphate ; Fe : concentration en fer dissous. Les valeurs moyennes importantes sont représentées par des nuances de jaune.

Emprise globale

JDD1

	SST (°C)		Chl (mg/m3)		Bathymétrie (m)	
Groupe	Moy*	ET**	Moy	ET	Moy	ET
0	26,97	0,77	0,09	0,010	-3340	842
1	24,76	1,04	0,10	0,013	-1595	493
2	25,32	0,98	0,17	0,152	-144	139
3	24,07	0,82	0,11	0,009	-3518	865
4	28,17	0,30	0,06	0,006	-3038	418

JDD2

	SST (°C)		Chl (mg/m3)		Bathymétrie (m)		FSLE	
Groupe	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0	26,94	0,76	0,089	0,011	-3313	931	-0,064	0,005
1	24,44	0,60	0,106	0,013	-2882	1049	-0,096	0,008
2	24,20	0,89	0,105	0,010	-2630	1152	-0,069	0,006
3	28,14	0,31	0,062	0,007	-3029	424	-0,049	0,003
4	25,52	1,16	0,153	0,122	-293	241	-0,063	0,015

JDD3

	Chl (mg/m3)		Fe (µmol/m3)		NO3 (mmol/m3)		O2 (mmol/m3)		PO4 (mmol/m3)		Si (mmol/m3)	
Groupe	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0	0,08	0,01	0,48	0,15	0,001	0,001	207,9	2,0	0,12	0,02	1,28	0,03
1	0,08	0,01	0,41	0,16	0,005	0,005	216,2	2,4	0,09	0,01	1,19	0,03
2	0,13	0,01	0,29	0,04	0,016	0,005	212,2	1,9	0,12	0,01	1,24	0,03
3	0,10	0,01	1,15	0,32	0,002	0,001	209,2	3,1	0,11	0,02	1,27	0,02
4	0,08	0,01	0,26	0,10	0,001	0,001	202,1	1,7	0,17	0,02	1,33	0,02
5	0,14	0,02	0,25	0,06	0,038	0,016	216,9	2,1	0,12	0,01	1,17	0,04

PNMC

JDD1

	SST (°C)		Chl (mg/m3)		Bathymétrie (m)	
Groupe	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0	24,17	0,47	0,104	0,006	-3645	821
1	26,92	0,56	0,084	0,005	-3686	804
2	24,39	0,76	0,117	0,006	-1653	583
3	24,88	0,55	0,093	0,004	-1980	642
4	26,25	0,50	0,104	0,006	-3566	891
5	25,36	0,65	0,130	0,025	-98	90

JDD2

	SST (°C)		Chl (mg/m3)		Bathymétrie (m)		FSLE	
Groupe	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0	24,02	0,43	0,108	0,008	-3067	1099	-0,069	0,003
1	26,94	0,54	0,084	0,005	-3689	823	-0,068	0,003
2	25,34	0,67	0,129	0,025	-135	143	-0,072	0,004
3	24,70	0,51	0,094	0,006	-1873	604	-0,077	0,006
4	25,89	0,67	0,101	0,007	-3399	1014	-0,067	0,003
5	25,11	0,61	0,116	0,009	-1990	847	-0,055	0,008

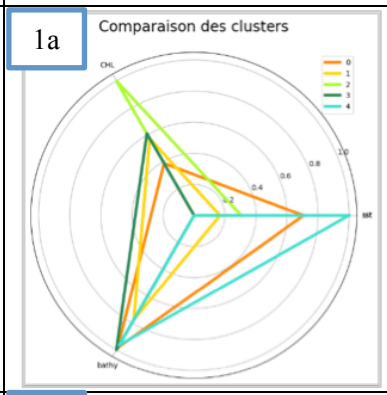
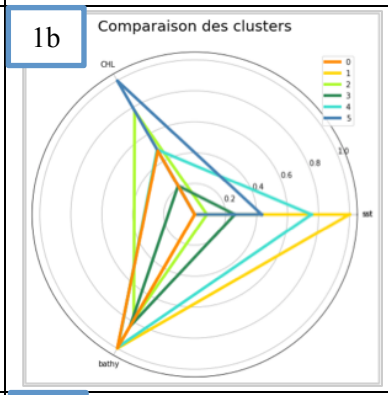
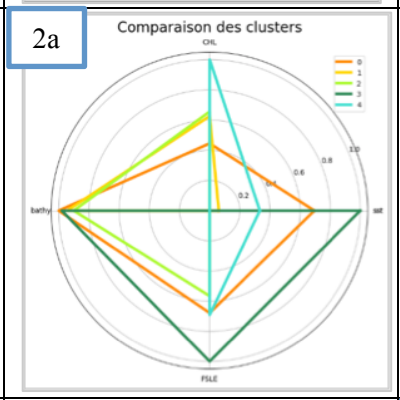
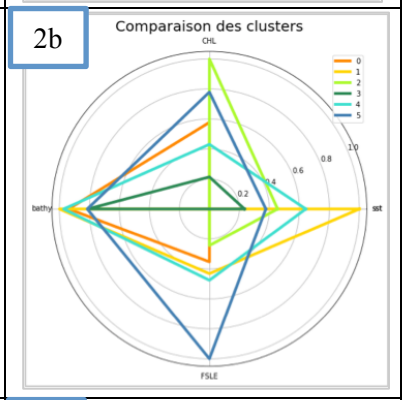
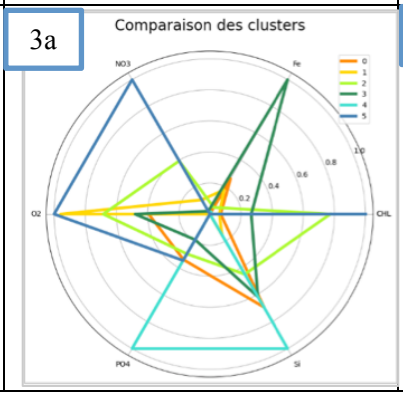
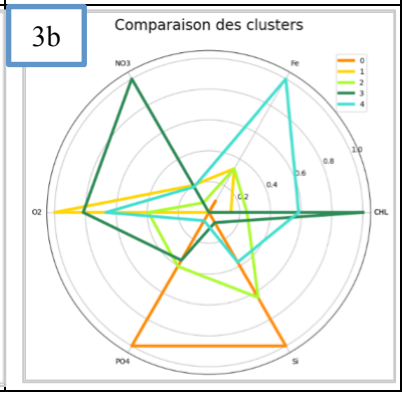
JDD3

	Chl (mg/m3)		Fe (µmol/m3)		NO3 (mmol/m3)		O2 (mmol/m3)		PO4 (mmol/m3)		Si (mmol/m3)	
Groupe	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0	0,08	0,00	0,36	0,08	0,001	0,000	205,2	1,4	0,14	0,01	1,32	0,01
1	0,08	0,01	0,53	0,13	0,003	0,002	214,5	1,9	0,09	0,01	1,22	0,02
2	0,09	0,01	0,53	0,13	0,001	0,001	208,8	1,2	0,11	0,01	1,28	0,02
3	0,11	0,01	0,30	0,05	0,011	0,003	212,8	1,7	0,11	0,01	1,23	0,02
4	0,10	0,01	1,00	0,23	0,003	0,001	211,4	1,6	0,09	0,01	1,26	0,02

* Moy = Moyenne ** ET = Ecart-type

Le tableau 3 permet d'identifier le niveau d'isolement des clusters par rapport aux autres. Les moyennes de chaque variable ont été normalisées et présentées graphiquement dans le tableau 4 afin de faciliter la compréhension. Plus un cluster se distingue des autres, plus le regroupement des points est justifié. Par exemple, pour le cluster 2 du JDD1 de l'emprise étendue (Tableau 4, 1a, vert clair), les valeurs normalisées de la concentration en chlorophylle-a, de la température de surface de l'eau et de la bathymétrie se détachent toutes vis à vis des autres clusters. Cela rend compte d'une certaine stabilité du cluster et induit que les points ont de fortes chances d'être regroupés à nouveau ensemble si l'algorithme de classification est rejoué.

Tableau 4. Comparaison de la valeur moyenne normalisée de chaque variable pour chaque cluster et chaque jeu de paramètres. 1a et 1b) en haut : CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; en bas : bathymétrie ; à droite : SST (température de surface de l'eau). 2a et 2b) en haut : CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; à gauche : bathymétrie ; à droite : SST (température de surface de l'eau) ; en bas : FSLE (Exposants de Lyapunov à taille finie). 3a et 3b) dans le sens horaire en partant de la gauche : O2 (concentration en oxygène dissous) ; NO3 (concentration en nitrate) ; Fe (concentration en fer dissous) ; CHL (concentration en chlorophylle-a en surface) ; Si (concentration en silice) ; PO4 (concentration en phosphate)

	Emprise étendue	Emprise restreinte au PNMC
JDD-1 « Classique »	1a 	1b 
JDD-2 « Connectivité »	2a 	2b 
JDD-3 « Biogéochimique »	3a 	3b 

3.3.1. JDD-1 « Classique »

• Emprise étendue

Pour la classification appliquée à l'emprise étendue, le groupe n°4 (Figure 27 1a, bleu clair), au nord-est de l'archipel du Vanuatu, est principalement caractérisé par une température de surface élevée (Figure 10) et une faible concentration de chlorophylle-a (Figure 12).

La classification de la région sud de l'emprise est dominée par la bathymétrie. En effet, le groupe n°1 (1a, jaune) est scindé en trois parties qui correspondent chacune respectivement de gauche à droite aux rides de Lord Howe et Fairway, aux rides de Norfolk et des Loyautés, et à l'arc volcanique de l'archipel du Vanuatu. Le groupe n°3 (1a, vert foncé), également scindé en trois, caractérise les bassins de Lord Howe, de la Nouvelle-Calédonie et des îles Loyautés.

La région sud est marquée par des températures plus faibles et une concentration de chlorophylle-a plus élevée qu'au nord. Ces deux facteurs semblent discriminer le groupe n°3 (1a, vert foncé) et le groupe n°0 (1a, orange), la bathymétrie y étant semblable.

Le groupe n°2 (1a, vert clair), plus morcelé, caractérise les zones de faible bathymétrie et de concentration de chlorophylle-a plus élevée. Ainsi, le groupe n°2 correspond aux récifs émergés et bancs, notamment ceux de la chaine de guyots de Lord Howe, les bancs de Lord Howe et le récif de Fairway ainsi que les pentes externes des îles de l'archipel du Vanuatu.

• PNMC et comparaison avec l'emprise étendue

Bien que la restriction à l'emprise du PNMC influence le résultat de la classification (notamment pour la région nord), le nombre de cluster imposé (5 pour l'emprise étendue et 6 pour le PNMC) semble être le principal facteur de modification pour la région sud par rapport à l'emprise étendue.

Le groupe n°3 de l'emprise étendue (1a, vert foncé) est similaire au groupe n°0 du PNMC (1b, orange), la province constituée des bassins de Lord Howe, de la Nouvelle-Calédonie et des Loyautés semble donc être stable par rapport au jeu de paramètres JDD-1. De même, le groupe n°2 de l'emprise étendue (1a, vert clair), qui caractérise les récifs et les bancs, s'apparente au groupe n°5 du PNMC (1b, bleu foncé).

Le groupe n°1 de l'emprise étendue (1a, jaune) regroupe le groupe n°2 du PNMC (1b, vert clair) qui caractérise la ride de Norfolk et des Loyautés et le groupe n°3 du PNMC (1b, vert foncé). La séparation en deux groupes lors du passage à l'emprise du PNMC vient peut-être en réalité de l'ajout d'un groupe à la classification.

Le groupe principal n°0 du nord de l'emprise étendue (1a, orange) se divise en deux groupes lors de la classification à l'échelle du PNMC : le groupe n°1 (1b, jaune) et le groupe n°4 (1b, bleu clair).

3.3.2. JDD-2 « Connectivité »

• Comparaisons entre JDD-1 et JDD-2 pour l'emprise étendue

Pour une même emprise, JDD-1 et JDD-2 présentent des similarités expliquées par leurs trois variables communes (bathymétrie, SST et chlorophylle-a). Ainsi, pour l'emprise étendue (2a), trois groupes sont assez similaires à ceux présents dans le découpage de l'emprise étendue du JDD-1 (1a) :

- Le groupe n° 3 (2a, vert foncé) situé au nord-est de l'archipel du Vanuatu et le groupe n°4 (1a, bleu clair). Cette zone, caractérisée par des concentrations de chlorophylle-a faibles, est également marquée par des valeurs de FSLE plus élevées.
- Le groupe n°4 (2a, bleu clair), associé aux récifs émergés et aux bancs et le groupe n°2 (1a, vert clair).
- Le groupe n°0 (1a, orange) qui pave le partie Nord du JDD-1 est également présent sous le groupe n°0 (2a, orange) du JDD-2.

La différence majeure de classification entre JDD-1 et JDD-2 est la disparition des groupes associés aux rides (groupe n°1, 1a, jaune) et aux bassins (groupe n°3, 1a, vert foncé). L'influence prédominante de la bathymétrie dans JDD-1 diminue dans JDD-2 avec la prise en compte du FSLE. Ce dernier, homogène sur la zone sud/sud-est, rapproche les points qui forment le groupe n°2 (2a, vert clair). De cette même manière, le groupe n°1 (2a, jaune), à l'ouest de la chaine des guyots de Lord Howe, est caractérisé par des valeurs de FSLE plus faibles que pour le reste du domaine.

- PNMC

Le clustering est très différent lorsqu'on s'intéresse uniquement au PNMC. Néanmoins, le groupe associé aux récifs émergés et aux bancs reste présent (groupe n°2, 2b, vert clair). Plus de concordances sont observées entre les deux découpages du PNMC (JDD-1 et JDD-2) qu'entre le découpage du PNMC et de l'emprise étendue alors même qu'ils se basent sur les mêmes variables de clustering. Ainsi, le découpage du PNMC JDD-2 se rapproche du découpage du PNMC JDD-1 par les groupes n°1 (2b, jaune), n°4 (2b, bleu clair), n°3 (2b, vert foncé) et n°0 en partie (2b, orange). Les écart-types associés à chacun de ces groupes sont plus importants pour le JDD-2 que pour le JDD-1 car l'ajout de la variable FSLE impose une nouvelle contrainte (Tableau 3).

Trois différences sont notables entre les découpages du PNMC JDD-1 et JDD-2 :

- le groupe n°0 (1b, orange), associé aux bassins, n'est plus représenté au sud-ouest du PNMC.
- Le groupe n°2 (1b, vert clair), associé à la ride de Norfolk et au sud de la ride des Loyautés, n'est plus représenté.
- Le groupe n°5 du JDD-2 (2b, bleu foncé), qui englobe les eaux territoriales du sud de la Grande Terre et le bassin des Loyauté. Ce groupe est caractérisé par la plus importante valeur moyenne de FSLE du PNMC.

3.3.3. JDD-3 « Biogéochimique »

Au-delà d'une similarité purement visuelle, le découpage de l'emprise étendue (3a) et le découpage du PNMC (3b) sont analogues au regard des moyennes de leurs différents groupes (Tableau 3).

Le groupe n°5 (3a, bleu foncé), non défini dans l'espace de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie, se situe au sud-ouest (26°S, 156°E). Il se distingue par sa forte concentration en nitrates dans les données modélisées (Figure 20).

Le groupe n°3 pour l'emprise étendue (3a, vert foncé) et n°4 pour le PNMC (3b, bleu clair) est caractérisé par une concentration de fer plus importante que dans le reste de la zone. Ce groupe englobe les eaux provinciales et territoriales de la Nouvelle-Calédonie, et plus largement pour l'emprise étendue, les eaux de l'archipel du Vanuatu.

Les autres groupes du découpage de l'emprise étendue se répartissent de manière latitudinale, en particulier les groupes n°0 (3a, orange) et n°4 (3a, bleu clair) qui s'étendent de la longitude 156° à 175°E. Cette impression de stratification est due à l'oxygène dissous dont la distribution suit un gradient de concentration nord/sud.

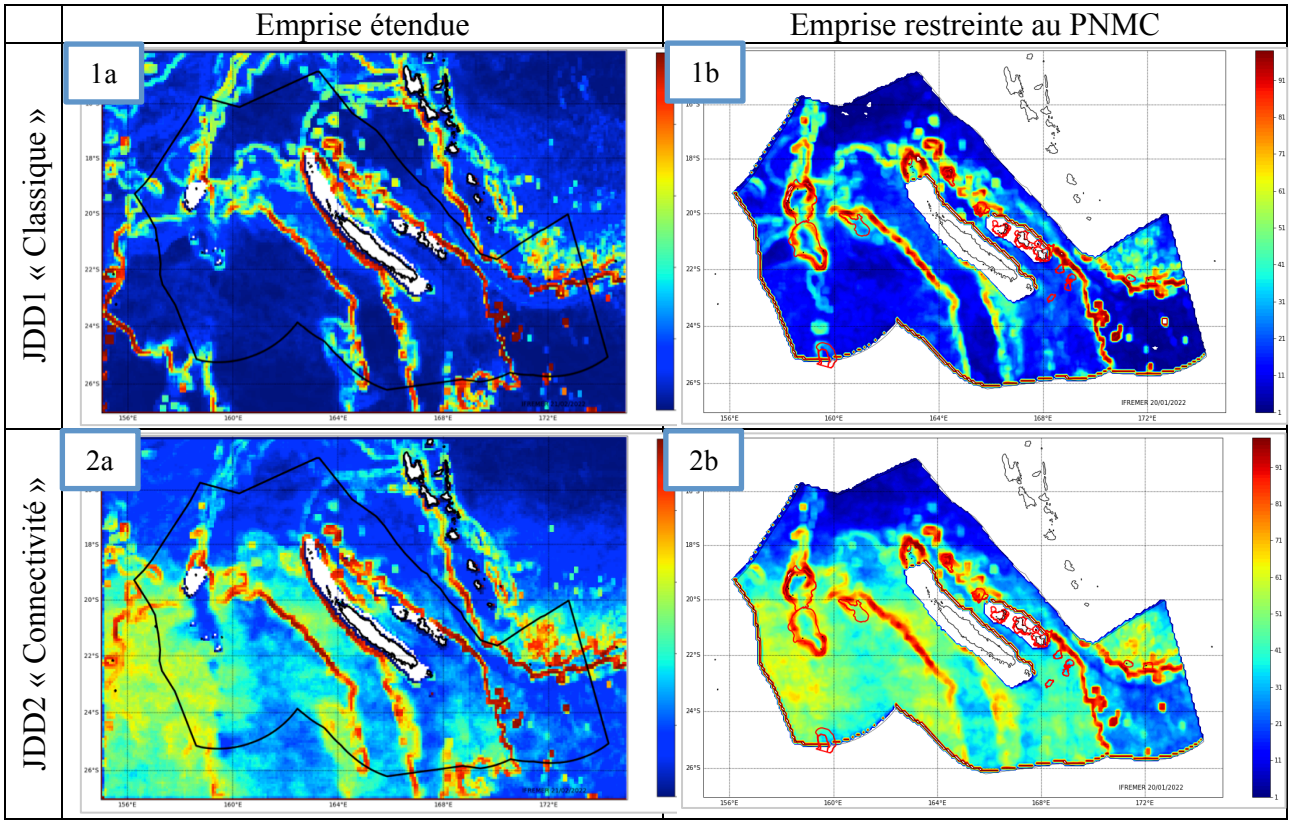
Les données biogéochimiques sont issues d'un modèle dont la résolution n'est pas suffisamment fine pour tenir compte des récifs comme les récifs de Chesterfield et Bellona. Ceci peut notamment expliquer que le JDD-3 à l'échelle du PNMC possède 5 groupes au lieu de 6 comme pour JDD-1 et JDD-2.

Enfin, le découpage semble visuellement proche des deux autres jeux de données, avec une disposition de clusters et un pavage de l'espace marin quelque peu similaire. En particulier, le découpage du PNMC du JDD-2 et celui du JDD-3 sont analogues, avec la présence dans les deux cas d'un groupe entourant la Nouvelle-Calédonie (groupe n°5 2b, bleu foncé et groupe n°4 3b, bleu clair).

Cette première partie de résultats a permis de mettre en évidence des zones spatialement homogènes et parfois stables malgré un changement de variables ou d'emprise. La partie suivante s'attache à analyser la cohérence temporelle de ces découpages.

3.4. Description des frontières

L'analyse de la stabilité dans le temps est faite à travers l'analyse des frontières, comme expliqué précédemment (cf. Section 2.4.3).



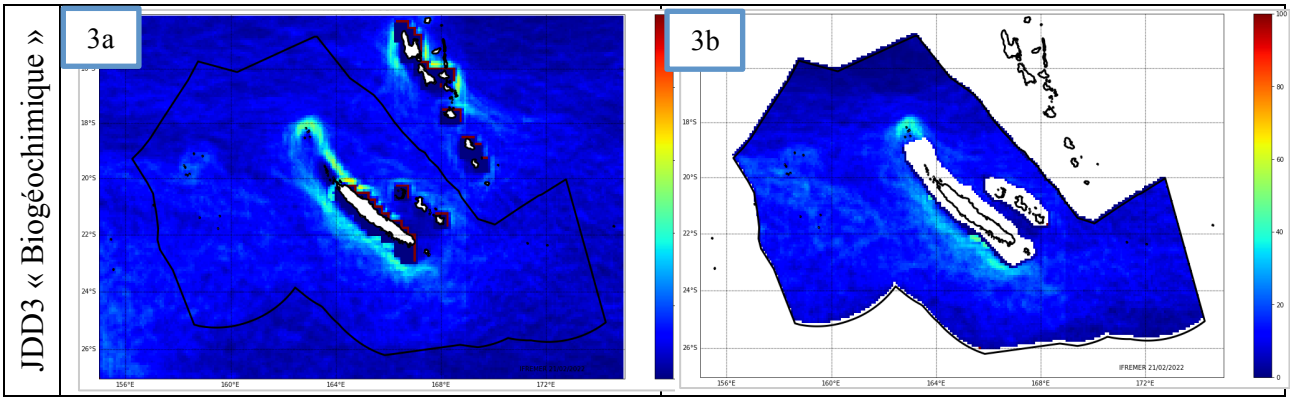


Figure 28 : Stabilité des frontières dans chaque cas de figure. La colorbar indique le pourcentage du temps où un pixel a été défini comme frontière (0 à 100%)

3.4.1. JDD-1

Dans l'ensemble, le jeu de paramètres classiques JDD-1 a les limites les plus stables dans le temps (Figure 28, 1a et 1b), les pixels frontières sont peu nombreux et le pourcentage de temps où ils le sont est élevé (pixels rouges de la Figure 28, 1a et 1b).

Précisément, pour l'emprise étendue (1a), les frontières sont très clairement définies et spatialement stables dans le temps, cela est notamment lié à la bathymétrie :

- Deux frontières limitrophes du bassin Sud Fidjien, l'une située au nord et délimitée par la fosse des Nouvelles-Hébrides ; et l'autre longeant la pente de la ride des loyautés. Ces deux frontières sont nettement marquées spatialement (il y a un fort contraste entre la frontière et le reste de la zone) et temporellement puisque qu'elles sont présentes plus de 80% du temps.
- Deux frontières stables spatialement et temporellement : une à la limite ouest de la ride de Norfolk qui remonte le long de la pente externe de la Grande Terre, l'autre passant à l'est du récif de Fairway, de la ride de Lord Howe et du bassin de Fairway. Entre ces deux frontières se trouve le bassin de Nouvelle-Calédonie.

Ces frontières sont à mettre en relation avec la classification morphologique des fonds marins présentée dans l'Analyse stratégique du PNMC (Gardes et al., 2014). On remarque une forte correspondance entre les frontières très stables et les zones de fortes pentes, excepté pour la chaîne de guyot de Lord Howe à partir du plateau des Chesterfield qui n'apparait pas comme une frontière dans le découpage du JDD-1 global. A l'ouest, une frontière stable est à l'extérieur des limites administratives de la ZEE et correspond à la limite ouest du bassin de Lord Howe.

Vis-à-vis de l'emprise étendue, la stabilité temporelle des frontières pour le PNMC diminue, en particulier pour les frontières délimitant le bassin de Nouvelle-Calédonie. Les pixels passent de 90% à 65% du temps où ils sont considérés comme frontières. Par ailleurs, contrairement au découpage de l'emprise étendue, on constate l'apparition de frontières qui délimitent le plateau Bellona et la chaîne de guyot de Lord Howe.

3.4.2. JDD-2

Malgré des lignes rouges continues pour le JDD-2 (2a et 2b), de nombreux pixels ont été associés à des bordures, et ce de manière répétée, ce qui traduit des frontières fortement variables dans le temps. Néanmoins, la majorité des frontières décrites pour JDD-1 restent présentes mais avec une diminution du contraste, traduisant la plus grande variabilité.

La récurrence des pixels frontières diminue au niveau du sud des frontières délimitant le bassin de la Nouvelle-Calédonie. Au sud-ouest de la ZEE, on détecte une zone instable spatialement liée à l'activité à méso-échelle (FSLE) particulièrement élevée dans cette région.

Comme pour le JDD-1, le passage de l'emprise étendue au PNMC engendre une plus grande variabilité, mais met également en lumière le plateau de Bellona.

Si on met en relation l'ajout des FSLE avec l'augmentation importante de l'instabilité des frontières, le JDD-1 peut paraître, à l'inverse, trop superficiel vis-à-vis de la variabilité réelle de l'environnement océanique.

3.4.3. JDD-3

Les cartes de frontières (3a et 3b) mettent en évidence une récurrence des bordures quasi-nulle qui traduit une très forte variabilité temporelle et spatiale. Des frontières relativement plus stables que les autres se distinguent cependant au pourtour des zones récifales. Ainsi, la zone longeant les lagons ouest de Nouvelle-Calédonie et celle au niveau des récifs d'Entrecasteaux correspondent à une frontière dans environ 40% du temps pour l'emprise étendue (3a). Le nord de l'archipel du Vanuatu se démarque de la même façon. A noter cependant que le modèle utilisé ne tient que peu voire pas compte des lagons à l'échelle du fait de sa résolution initiale (1/4°).

4. Discussion

4.1. Nombre de groupe optimal k=5 ou k=6

Il est intéressant de remarquer que l'ensemble des régionalisations amène à considérer 5 ou 6 groupes. Pour le cas des découpages restreints au PNMC, on constate que le JDD-1 et le JDD-2 sont composés de 6 groupes, par rapport au JDD-3, formé de 5 groupes. Avoir trouvé, pour tous les cas de figures, un découpage optimal en 5 ou 6 masses d'eaux démontre la possibilité de regrouper ces espaces malgré leur grande diversité supposée. Ce résultat est d'autant plus intéressant que pour certaines régions plus vastes, les études de biorégionalisation sont parfois confrontées à un souci d'échelle. En effet, un trop grand nombre de groupes n'est pas pertinent pour prendre part à des plans de gestion ou de management, tandis que des unités trop grandes ou vastes ne sont pas représentatives de la diversité/variabilité présente *in situ* (Norse et al., 2010).

4.2. Sensibilité à l'emprise

Certains groupes étant entièrement hors du PNMC, comme c'est le cas pour le groupe au nord-est du Vanuatu (JDD-1 et JDD-2), le clustering a également été réalisé à l'échelle du PNMC seul. Cependant, comme ses limites sont de nature administrative et ne relèvent pas d'une réalité physique, cela génère des groupes qui sont scindés « artificiellement ». Ainsi, un groupe peut se retrouver au nord-ouest et au nord-est, semblant de fait séparé dû à la forme de la ZEE (Figure 27 JDD-2, 2b, groupe n°1). Visuellement, JDD-2 est le plus sensible au changement d'emprise, ce qui peut sans doute être expliqué par le caractère lagrangien de la variable ajoutée. En effet les FSLE intègre une notion de trajectoire et de déplacement spatial qui n'est pas pris en compte dans toutes les autres variables.

4.3. Influence du jeu de données

Sans surprise, le jeu de paramètres modifie les paysages obtenus et le choix des paramètres se doit de répondre à une problématique et à un objectif donné.

Les FSLE, par leur nature dynamique et spatiale, sont décorrélés des autres variables (bathymétrie, concentration en chlorophylle-a, température). Répondre à la question du poids des variables permet aussi de comprendre l'importance d'un paramètre sur la classification. Le choix des variables utilisées pour constituer le jeu de données doit faire l'objet d'une étude approfondie préalable (Snelder, 2007).

L'utilisation d'un trop grand nombre de paramètres conduit à l'augmentation du nombre de groupes, qui doit rester raisonnable pour comprendre les résultats obtenus, réussir leur intégration à des plans de gestion, éviter une perte de cohérence intra-groupe. Ce dernier point est constaté, à moindre échelle, pour le JDD-2. L'ajout des FSLE, vis-à-vis du JDD-1, augmente les écart-types de toutes les variables de chaque groupe. A l'inverse, certains jeux de données peuvent ne pas rendre compte de la véritable complexité *in situ*. Par exemple, JDD-1 pose la question de la pertinence de son découpage qui semble basé principalement sur la bathymétrie. Or, dans une dynamique de gestion, la bathymétrie seule ne donne pas d'indications directes sur les zones sensibles ou sur une quelconque richesse biologique. La bathymétrie indique, certes, les monts sous-marins, potentiellement hotspots de biodiversité, mais ne peut l'affirmer seule. Nieblas souligne également l'importance des caractéristiques méso-échelles qui sont une source importante de variabilité et donc des composantes importantes à inclure dans la biorégionalisation. De plus, les données satellitaires sont des données de surface et les données issues de modèles ne sont pas largement répandues ou ne le sont qu'à des résolutions grossières (e.g modèles globaux). Les données ne rendent donc pas directement compte des écosystèmes benthiques et caractériser le benthos à travers les écosystèmes pélagiques est complexe (Navarrete et al., 2005). A cela s'ajoute le débat sur le traitement des masses d'eau comme habitats persistants et spatialement distincts alors même qu'elles sont soumises à des dynamiques océaniques temporellement et spatialement variables (Roberson et al., 2017).

Bien que l'identification des limites d'un habitat soit difficile dans les environnements pélagiques, ces bio-régionalisations peuvent permettre de définir des limites écologiques et fonctionnelles dynamiques suffisamment prévisibles pour délimiter des zones d'abondance de nourriture, de reproduction ou d'habitats privilégiés par exemple (Receveur et al., 2020 ; Receveur et al., 2022). Cela permettrait d'appuyer la définition d'aires marines à protéger prioritairement. Dans le PNMC, ce point pourrait être essentiel car si les récifs émergés et les bancs sont majoritairement réglementés par des plans de conservations, une perspective du parc à moyen terme pourra être de développer des plans de gestion/zones protégées en haute mer, et ces zones pourraient être définies en partie sur la base d'un travail de biorégionalisation (Lourie et Vincent, 2004).

4.4. Stabilité des frontières

L'étude de la stabilité des frontières est nécessaire et permet de mettre en perspective le découpage obtenu. La stabilité des frontières pour un groupe donné indique si ce dernier est représentatif des conditions hydrodynamiques, océanographiques et biogéochimiques locales : une stabilité plus élevée donne une plus grande crédibilité.

Les découpages obtenus, mis en parallèle avec la stabilité de leurs frontières, montre qu'un certain nombre de frontières très stables ne correspond pas aux limites de certains groupes. Ce phénomène s'explique par le fait que les deux échelles de fréquences soient différentes. Les

pixels du découpage sont constitués de moyennes temporelles d'une période de 17 ans (fréquence faible), tandis que le calcul de frontières est réalisé à partir de découpages mensuels, la fréquence est 204 fois plus élevée.

Si certains découpages des JDD-1 et JDD-2 sont globalement stables et exploitables, le découpage du JDD-3 nécessite un approfondissement et un remaniement de la méthode car la variabilité temporelle et spatiale est trop importante. De fait, certains phénomènes ne peuvent pas être considérés à des échelles climatiques aussi grandes, notamment les phénomènes biogéochimiques qui sont soumis à des dynamiques soudaines et éphémères.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de tenir compte de variabilité saisonnière ou climatique comme c'est le cas dans certaines études (Planque et al., 2004 ; Oliver et Irwin, 2008). Dans le cas particulier de la Nouvelle-Calédonie, évaluer la variabilité du découpage en fonction de phénomènes climatiques tel que le phénomènes ENSO (El Nino Southerm Oscillation) semble également un angle d'approche pertinent.

5. SYNTHESE

Ce rapport constitue un premier essai de régionalisation à l'échelle du Parc Naturel de la Mer de Corail. Il s'intéresse particulièrement à la sensibilité des découpages obtenus en fonction des paramètres utilisés dans l'analyse ainsi que dans les emprises spatiales prises en compte pour les analyses. Même si de nombreux points méthodologiques restent à travailler (e.g choix du nombre de clusters, de l'emprise spatiale, et des paramètres environnementaux à considérer), les 3 types de découpages réalisés ici montrent une certaine stabilité du nombre de sous-régions (5 ou 6). Cette étude préliminaire pointe l'intérêt de développer une approche de régionalisation plus approfondie afin d'appuyer la gestion et le management du Parc Naturel de la Mer de Corail.

6. BIBLIOGRAPHIE

Ayata, S. D., Irisson, J. O., Aubert, A., Berline, L., Dutay, J. C., Mayot, N., ... & Guieu, C. (2018). Regionalisation of the Mediterranean basin, a MERMEX synthesis. Progress in Oceanography, 163, 7-20.

Beliaeff B., Bouvet G., Fernandez J-M, Laugier T. David C. (2011). Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT Le Nickel., 169.

Caudmont, S. and Maitrepierre, L.: Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie, Météo-France – Direction interrégionale de Nouvelle-Calédonie et de Wallis-et-Futuna, Nouméa, 130 pp., 2006

Clark, M. R., Althaus, F., Williams, A., Niklitschek, E., Menezes, G. M., Hareide, N. R., ... & O'Donnell, C. (2010). Are deep-sea demersal fish assemblages globally homogenous? Insights from seamounts. Marine Ecology, 31, 39-51.

Cravatte, S., Kestenare, E., Eldin, G., Ganachaud, A., Lefèvre, J., Marin, F., ... & Aucan, J. (2015). Regional circulation around New Caledonia from two decades of observations. Journal of Marine Systems, 148, 249-271.

Derville, S., Torres, L. G., & Garrigue, C. (2018). Social segregation of humpback whales in contrasted coastal and oceanic breeding habitats. Journal of Mammalogy, 99(1), 41-54.

d'Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E., & López, C. (2004). Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents. Geophysical Research Letters, 31(17).

Gardes L., T. E.-F.-B. (2014). Analyse stratégique de l'Espace maritime de la Nouvelle-Calédonie – vers une gestion intégrée. Agence des aires marines protégées / Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie éditeurs.

Grant, S., Constable, A., Raymond, B., & Doust, S. (2006). Bioregionalisation of the Southern Ocean: report of experts workshop, Hobart, September 2006. WWF-Australia and ACE CRC.

Hobday, A. J., Young, J. W., Moeseneder, C., & Dambacher, J. M. (2011). Defining dynamic pelagic habitats in oceanic waters off eastern Australia. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 58(5), 734-745.

Krug, L. A., Platt, T., Sathyendranath, S., & Barbosa, A. B. (2017). Ocean surface partitioning strategies using ocean colour remote Sensing: A review. Progress in Oceanography, 155, 41-53.

Lourie, S. A., & Vincent, A. C. (2004). Using biogeography to help set priorities in marine conservation. Conservation Biology, 18(4), 1004-1020.

MacQueen, J. (1967). Classification and analysis of multivariate observations. In 5th Berkeley Symp. Math. Statist. Probability (pp. 281-297).

Marchesiello, P., Lefèvre, J., Vega, A., Couvelard, X., & Menkes, C. (2010). Coastal upwelling, circulation and heat balance around New Caledonia's barrier reef. Marine pollution bulletin, 61(7-12), 432-448.

Morato, T., Hoyle, S. D., Allain, V., & Nicol, S. J. (2010). Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(21), 9707-9711.

Navarrete, S. A., Wieters, E. A., Broitman, B. R., & Castilla, J. C. (2005). Scales of benthic–pelagic coupling and the intensity of species interactions: from recruitment limitation to top-down control. Proceedings of the National Academy of Sciences, 102(50), 18046-18051.

Nieblas, A. E., Drushka, K., Reygondeau, G., Rossi, V., Demarcq, H., Dubroca, L., & Bonhommeau, S. (2014). Defining Mediterranean and Black Sea biogeochemical subprovinces and synthetic ocean indicators using mesoscale oceanographic features. PloS one, 9(10), e111251.

Oliver, M. J., Glenn, S., Kohut, J. T., Irwin, A. J., Schofield, O. M., Moline, M. A., & Bissett, W. P. (2004). Bioinformatic approaches for objective detection of water masses on continental shelves. Journal of Geophysical Research: Oceans, 109(C7).

Oliver, M. J., & Irwin, A. J. (2008). Objective global ocean biogeographic provinces. Geophysical research letters, 35(15).

Perruche, C. S. (2019). Quality information document. Copernicus. Marine Environment Monitoring Service., 35.

Planque, B., Lazure, P., & Jégou, A. M. (2004). Detecting hydrological landscapes over the Bay of Biscay continental shelf in spring. Climate research, 28(1), 41-52.

Receveur, A., Vourey, E., Lebourges-Dhaussy, A., Menkes, C., Ménard, F., & Allain, V. (2020). Biogeography of micronekton assemblages in the Natural Park of the Coral Sea. Frontiers in Marine Science, 7, 449.

Receveur, A., Allain, V., Menard, F., Lebourges Dhaussy, A., Laran, S., Ravache, A., ... & Menkes, C. (2022). Modelling marine predator habitat using the abundance of its pelagic prey in the tropical South-Western Pacific. Ecosystems, 25(4), 757-779.

Reygondeau, G., Guieu, C., Benedetti, F., Irisson, J. O., Ayata, S. D., Gasparini, S., & Koubbi, P. (2017). Biogeochemical regions of the Mediterranean Sea: An objective multidimensional and multivariate environmental approach. Progress in oceanography, 151, 138-148.

Rice, J., Gjerde, K. M., Ardron, J., Arico, S., Cresswell, I., Escobar, E., ... & Vierros, M. (2011). Policy relevance of biogeographic classification for conservation and management of marine biodiversity beyond national jurisdiction, and the GOODS biogeographic classification. Ocean & coastal management, 54(2), 110-122.

Roberson, L. A., Lagabrielle, E., Lombard, A. T., Sink, K., Livingstone, T., Grantham, H., & Harris, J. M. (2017). Pelagic bioregionalisation using open-access data for better planning of marine protected area networks. Ocean & coastal management, 148, 214-230.

Rossi, V., Ser-Giacomi, E., López, C., & Hernández-García, E. (2014). Hydrodynamic provinces and oceanic connectivity from a transport network help designing marine reserves. Geophysical Research Letters, 41(8), 2883-2891.

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of computational and applied mathematics, 20, 53-65.

Samadi, S., Bottan, L., Macpherson, E., De Forges, B. R., & Boisselier, M. C. (2006). Seamount endemism questioned by the geographic distribution and population genetic structure of marine invertebrates. Marine Biology, 149(6), 1463-1475.
Snelder, T. H., Leathwick, J. R., Dey, K. L., Rowden, A. A., Weatherhead, M. A., Fenwick, G. D., ... & Zeldis, J. R. (2007). Development of an ecologic marine classification in the New Zealand region. Environmental Management, 39(1), 12-29.

Spalding, M. D., Agostini, V. N., Rice, J., & Grant, S. M. (2012). Pelagic provinces of the world: a biogeographic classification of the world's surface pelagic waters. Ocean & Coastal Management, 60, 19-30.

Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdaña, Z. A., Finlayson, M. A. X., ... & Robertson, J. (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. BioScience, 57(7), 573-583.

White, M., Bashmachnikov, I., Arístegui, J., & Martins, A. (2007). Physical processes and seamount productivity. Seamounts: ecology, fisheries and conservation, 65-84.