



Université  
de Lille



**FACULTÉ  
DES SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES**

Département Station marine  
de Wimereux

Rapport de Stage de 2<sup>ème</sup> année de Master

**Mention Biodiversité, Ecologie, Evolution (BEE)**  
**Parcours FONctionnement et Gestion des Ecosystèmes Marins (FOGEM)**

Université de Lille, Faculté des Sciences et Technologies

Année 2019-2020

Régionalisation de l'espace maritime pour sa planification et  
gestion : le cas de la Baie de Seine

Jehanne RIVET

Encadrement :

Laurent DUBROCA & Thibault CARIOU





## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Table des figures .....   |    |
| Lexique .....   |    |
| Remerciements .....   |    |
| Introduction .....  | 1  |
| I. Contexte.....  | 1  |
| II. Objectif de l'étude .....   | 2  |
| Matériels et méthodes .....   | 4  |
| I. Les données.....   | 4  |
| I.a. Les paramètres environnementaux.....   | 5  |
| I.b. Les communautés biologiques.....   | 7  |
| I.c. Les usages anthropiques .....  | 9  |
| II. Traitements analytiques .....   | 10 |
| II.a. Vérification automatisée de la taxonomie .....                                  | 10 |
| II.b. Analyse des correspondances multiples.....                                      | 11 |
| II.c. Imputation des données .....  | 11 |
| II.d. Classification ascendante hiérarchique .....                                    | 11 |
| II.e. Optimisation de la classification : comparaison des méthodes d'agrégation ..... | 12 |
| II.f. Krigeage.....   | 12 |
| III. Analyses.....  | 13 |
| III.a. Les paramètres environnementaux .....  | 13 |
| III.b. Les communautés biologiques .....  | 14 |
| III.c. Les usages anthropiques .....  | 16 |
| Résultats .....   | 17 |
| I. Paramètres environnementaux.....   | 17 |
| I.a. Classifications individuelles .....  | 17 |
| I.b. Régionalisation finale .....   | 19 |
| I.c. Les substrats.....   | 20 |
| II. Communautés biologiques.....  | 21 |
| II.a. Regroupement des espèces.....   | 21 |
| II.b. Variogrammes et krigeage .....  | 24 |
| II.c. Classifications individuelles .....   | 25 |
| II.d. Régionalisation finale.....   | 27 |
| III. Usages anthropiques .....  | 27 |
| III.a. Législation.....   | 27 |

|  |    |
|--|----|
| III.b. Densité d'occupation de l'espace marin .....                      | 28 |
| Discussion.....  | 31 |
| I. Atouts de la méthodologie .....                                       | 31 |
| II. L'étude de la faune via les traits fonctionnels .....                | 32 |
| III. Interprétation et croisement des différentes régionalisations ..... | 33 |
| IV. Etude de cas.....  | 35 |
| V. Les limites.....  | 37 |
| Conclusion .....   | 38 |
| Bibliographie.....   | 39 |
| Annexes .....  |    |
| Résumé .....   |    |
| Abstract .....   |    |

## Table des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. L'approche de MSP définie par l'UNESCO dans son guide pour les Etats membres (extrait de Ehler et Douvère 2009).....   | 2  |
| Figure 2. Cartographie de la baie de Seine, avec ses principaux ports ainsi que les fleuves de plus grands débits s'y déversant. ....  | 4  |
| Figure 3. Carte des coups de chalut réalisés en baie de Seine durant la campagne CGFS, de 1988 à 2019.....   | 8  |
| Figure 4. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats des classifications pour chaque paramètre environnemental. Les zonations sont propres à chaque paramètre et sont issues d'une classification des séries temporelles des valeurs par pixels..... | 18 |
| Figure 5. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des paramètres environnementaux.....  | 20 |
| Figure 6. Boîtes à moustaches des conditions environnementales dans chaque zone de la baie de Seine, en fonction des valeurs maximales qui y sont observées. ....  | 20 |
| Figure 7. Cartographie des substrats marins en baie de Seine. ....   | 21 |
| Figure 8. Nuages de points issu de l'ACM, représentant les différentes espèces benthiques ainsi que les modalités des sept variables les caractérisant, dans un espace à deux dimensions. ....   | 22 |
| Figure 9. Ensemble des variogrammes entre 1988 et 2019 (noir) et variogramme moyen (rouge) de la communauté II. ....   | 24 |
| Figure 10. Ajustement du modèle mathématique le plus adapté au variogramme moyen de la communauté II. ....   | 24 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 11. Cartographie des valeurs de krigeage estimées pour la communauté biologique II, l'année 1996. Les points rouges correspondent aux traits de chalut dont la taille est proportionnelle à la densité de capture correspondantes.....   | 25 |
| Figure 12. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats des classifications pour chaque communauté biologique.....  | 26 |
| Figure 13. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des communautés biologiques.....  | 27 |
| Figure 14. Cartographie des différentes législations en baie de Seine. ....   | 28 |
| Figure 15. Cartographie des densités de navires par activité anthropique telles que présentées en section Matériels et méthodes I.c, en heure * kilomètre carré.....  | 29 |
| Figure 16. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des activités anthropiques.....   | 30 |
| Figure 17. Boîtes à moustache des densités de navires, par type d'activité.....   | 30 |
| Figure 18. Mise en parallèle des cartographies résumant l'information des différents facteurs étudiés. A : Régionalisation des conditions environnementale, B : Régionalisation des conditions biologiques, C : Régionalisation de l'occupation maritime, D : Cartographie des substrats marins, E : Cartographie des législations en baie de Seine. .... | 33 |
| Figure 19. Intégration du parc éolien de Courseulles-sur-mer (en bleu) dans les différentes régionalisations obtenues. ....   | 36 |

## Lexique

ACM : Analyse des correspondances multiples.

AIS : Automatic Identification System.

BIOTIC : Biological Traits Information Catalogue.

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique.

CGFS : Channel Ground Fish Survey.

DATRAS : Database of Trawl Surveys.

EMODnet : European Marine Observation and Data network.

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER.

MSP : Marine Spatial Planning.

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature.

WoRMS : World Register of Marine Species.

## Remerciements

Un grand merci à l'équipe de choc Laurent DUBROCA et Thibault CARIOU, pour tout ce qu'ils m'ont apporté durant ces 6 mois, que ça soit sur le plan intellectuel comme en termes de soutien moral. Merci à Thibault pour s'être rendu très disponible et patient, merci à Laurent pour cet humour bien singulier qui a redonné du soleil à certaines journées.

Un merci à l'ensemble de l'équipe de Port-en-Bessin qui a été particulièrement avenante, l'accueil chaleureux et l'intégration rapide m'ont énormément apporté sur le plan personnel.

## Introduction

Le stage dont il est question dans ce rapport s'est tenu à l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER), l'unité Manche-Mer du Nord et plus précisément le laboratoire de ressources halieutiques basé à Port-en-Bessin (14).

### I. Contexte

Actuellement, la gestion des espaces marins se fait majoritairement secteur d'activité par secteur d'activité, avec pour conséquence des superpositions d'usage et conflits de gouvernance ainsi qu'un impact sur l'environnement (perte de biodiversité, pollutions localisées...) qui pourraient être évités (Crowder and Norse 2008, Ehler and Douvère 2009). Considérer et partitionner un bassin dans son ensemble, en incluant son fonctionnement écologique et les activités qu'il supporte représente donc une solution pour coordonner les prises de décision et allouer les différentes zones identifiées à des activités spécifiques (Crowder and Norse 2008). Ce mode de gestion inclusif permet d'aboutir à une exploitation du milieu marin plus profitable, durable et respectueuse de l'environnement (Commission Européenne 2016). Depuis une quarantaine d'années, ce processus de planification spatiale marine, (ou Marine Spatial Planning, MSP), est reconnu et utilisé un peu partout autour du globe. Des Etats d'Asie l'utilisent pour atteindre des objectifs économiques et environnementaux (Ehler and Douvère 2009). En 2017, pas moins de 67 pays autour du globe avait déjà entamé une démarche de planification (Dupont et al. 2020).

Ces objectifs peuvent permettre d'atteindre un meilleur état environnemental et une meilleure rentabilité économique. Ils renforcent ainsi l'assurance que la zone considérée pour une certaine activité est adaptée à celle-ci. Les gestionnaires et les usagers gagnent en prévisibilité, sont aptes à envisager des projets plus modulables à l'évolution spatiale et temporelle, et l'acceptabilité sociétale globale s'en retrouve favorisée. C'est ainsi dans un contexte général plus transparent et pédagogue que les décisions sur la gestion de l'espace marin peuvent être prises (Commission Européenne 2016).

La multiplication des usages dans les eaux européennes a mis en lumière la nécessité de planifier cet espace dans le but de le gérer plus efficacement et durablement. Afin que cette gestion soit réalisable à l'échelle internationale, l'Union Européenne a établi en 2014 un cadre commun pour la planification de l'espace maritime (Directive-cadre pour la planification de l'espace maritime, DCPEM). Cette directive promeut la coopération entre les Etats membres dont les eaux font parties d'un même bassin marin, et qui nécessiteraient d'être gérées en tant qu'unité et non

comme plusieurs masses d’eaux distinctes soumises aux législations de leurs pays d’appartenance respectives (Parlement Européen et Conseil de l’Union Européenne 2014).

Le cadre spécifie ainsi des recommandations, dont la nécessité de réfléchir sur un plan écosystémique (autrement dit l’inclusion de l’ensemble des compartiments d’un écosystème dans son plan de gestion), le partage transfrontalier des données ou encore l’inclusion dans le processus d’une étape de concertation de l’ensemble des parties prenantes et du public. Cela étant, chaque Etat a la charge du contenu et du format des plans en question (Parlement Européen et Conseil de l’Union Européenne 2014).

## II. Objectif de l’étude

La démarche suivie dans cette étude vient compléter les nombreuses approches actuellement étudiées pour répondre à la directive européenne de partitionnement de ses eaux. Cette étude s’inscrit donc dans une démarche biogéographique, et plus précisément sur l’étape numéro 5 du processus de MSP détaillé par l’UNESCO : « Définir et analyser les conditions existantes » (Figure 1) (Ehler and Douvère 2009).

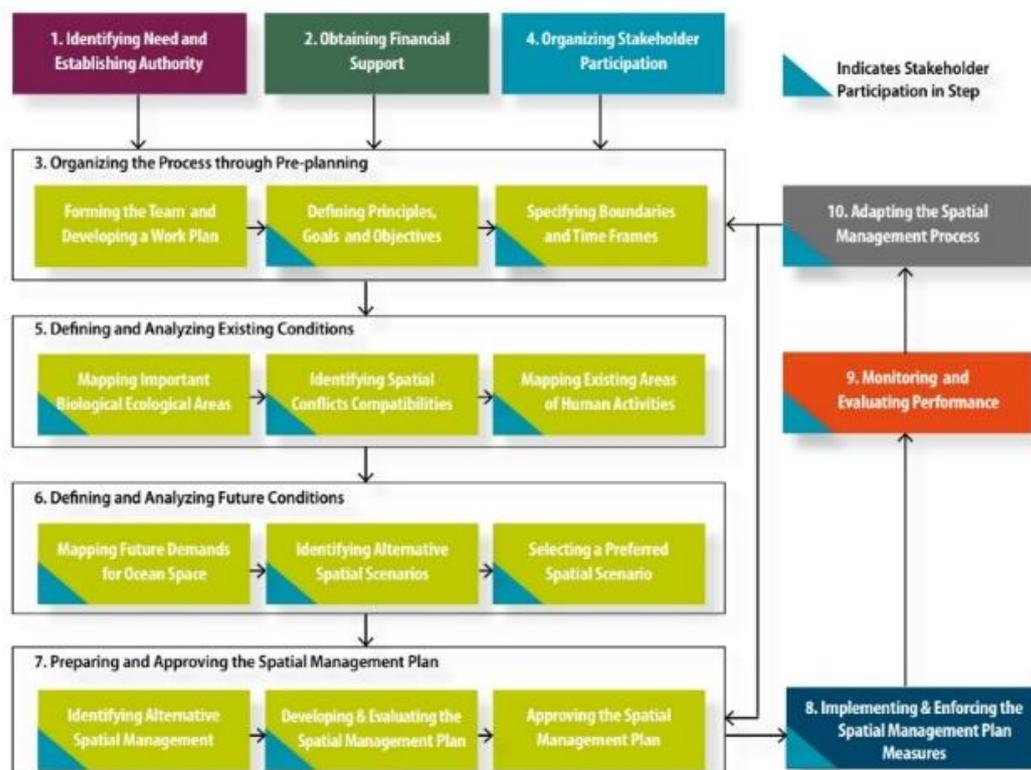


Fig. 1. A Step-by-Step Approach to Marine Spatial Planning

Figure 1. L’approche de Marine Spatial Planning définie par l’UNESCO dans son guide pour les Etats membres (extrait de Ehler et Douvère 2009).

Cette étape consiste donc à effectuer une cartographie des différentes activités anthropiques établies (ou planifiées) dans une zone donnée, afin d'identifier de potentiels points de friction entre ces secteurs, présents ou à venir. Parallèlement, il s'agit de délimiter une région marine en zones ou sous-groupes relativement homogènes par rapport à un ou plusieurs facteurs comme les conditions environnementales par exemple. Cette démarche est ce qu'on appelle la régionalisation (Ayata et al. 2018). Celles-ci conditionnent directement les processus écologiques et de fait les services écologiques rendus à l'Homme. En outre, un écosystème ne se résumant pas à des facteurs abiotiques, sa biocénose est également à considérer.

Différents portails européens mettent à disposition des jeux de données relatifs à ces différents facteurs et permettent ainsi de s'affranchir de la modélisation pour travailler avec des données observées. L'importante diversité des données que l'on peut traiter résulte en un nombre conséquent de méthodes de régionalisation qu'il est possible de suivre (Ayata et al. 2018). Celles-ci sont plus ou moins complexes, depuis des données univariées constantes puis variant dans le temps jusqu'à des données multivariées spatio-temporelles. A cela peut s'ajouter les données relative à la gestion et les usages du bassin marin qui ajoute une part de complexité aux cartes obtenues, comme les travaux de Marmin, Dauvin, et Lesueur en 2014 en témoignent. L'exercice est cependant primordial pour atteindre une gestion écosystémique de l'environnement tel que l'Union Européenne l'envisage (van Hoof 2015).

Facteurs environnementaux, structure des communautés biologiques et usages anthropiques sont donc autant d'éléments interdépendants. Leur intégration est donc indispensable dans le processus de MSP, car cette étape revient donc, à terme, à délimiter spatialement les zones les plus propices aux différentes activités anthropiques (Crowder and Norse 2008).

La région marine choisie dans le cadre de cette étude est la baie de Seine, qui s'étend entre le pays de Caux à l'est et la presqu'île du Cotentin à l'ouest (Figure 2), en Manche. Un certain nombre d'activités portuaires s'y concentre, comme le commerce, la pêche ou la plaisance. En outre, la baie concentre les estuaires de la Seine, de l'Orne et d'autres fleuves côtiers à influences moindres comme la Dives, la Touques, l'Aure, la Vire ou encore la Douve (Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval 2008). Au-delà des activités portuaires, la baie concentre un large panel d'activités anthropiques, comme le développement d'énergies renouvelables marines, l'extraction de granulats marins, le transport ou le tourisme (Commission administrative de la Façade Maritime Manche Est-Mer du Nord 2015). La zone présente également un certain nombre de zones protégées au titre de directives européennes, en raison d'une diversité d'habitats et d'espèces d'intérêts « communautaires ». En effet, la richesse biologique non négligeable en baie de Seine a contribué à la classification d'un certain nombre de ses sites sous la protection Natura 2000 (Muséum national d'Histoire naturelle 2020). Enfin, l'estuaire de la Seine en particulier remplit un

rôle de nourricerie très important pour les populations de poissons, notamment en raison de la température d'eau qui y est plus élevée (due à la faible profondeur), de son faible hydrodynamisme (site calme), de sa richesse en nutriments (apports fluviaux) ou encore de la nature de ses sédiments (fins et vaseux essentiellement) (Morin et al. 2010).

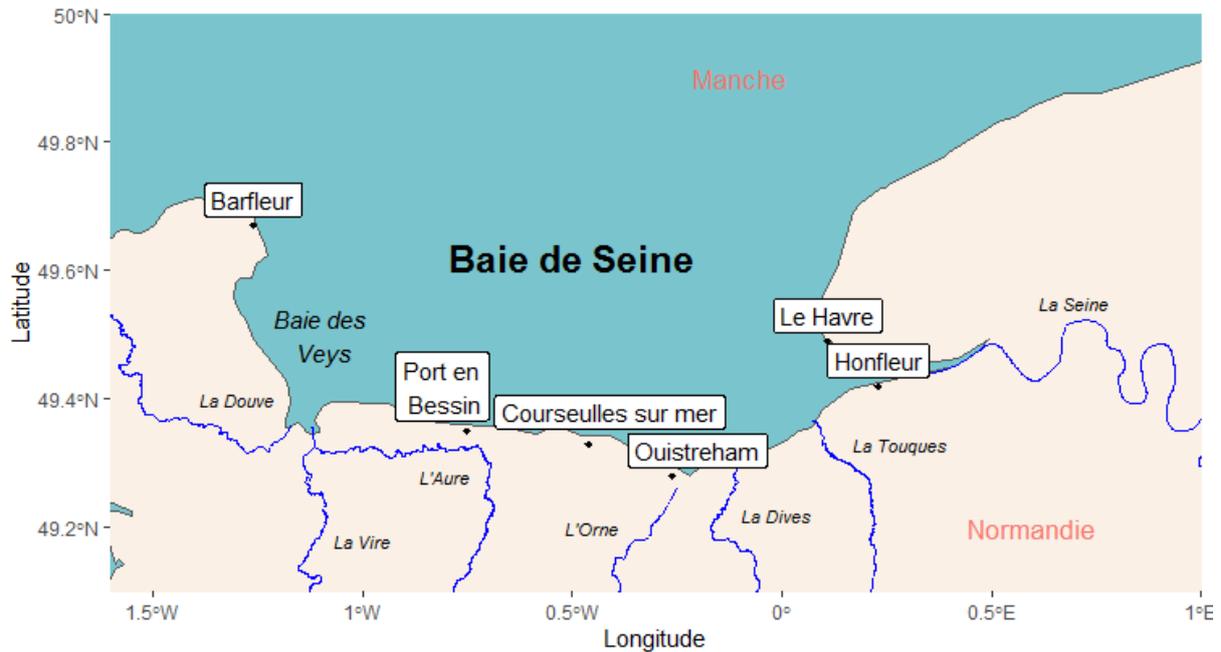


Figure 2. Cartographie de la baie de Seine, avec ses principaux ports ainsi que les fleuves de plus grands débits s'y déversant.

Comment peut-on donc résumer le fonctionnement d'un écosystème marin à l'aide d'un panel large de données complexes et variées ? C'est à cette problématique que tente de répondre ce rapport. Y sont explicitées les différentes étapes suivies pour aboutir à la régionalisation d'une zone marine, ici la baie de Seine, en fonction de différents facteurs. D'abord, les jeux de données nécessaires à l'étude, leur mise en forme puis le traitement analytique sont décrits. Ensuite, les résultats découlant de ces analyses sont présentés pour chaque type de données (environnementales, biologiques et anthropiques), avant de terminer sur leur discussion et la conclusion de ce rapport.

## Matériels et méthodes

### I. Les données

L'ensemble des données utilisées dans cette étude est accessible en ligne à partir des portails de diffusion des données marines Copernicus (données océanographiques issues de l'observation

satellitaire et de la modélisation et EMODnet (European Marine Observation and Data network) (Copernicus, EMODnet). Un tableau récapitulatif des principales informations relatives au huit paramètres environnementaux est disponible en Annexe 1.

### I.a. Les paramètres environnementaux

Afin de cerner au mieux le fonctionnement écologique de la baie, il a été décidé de travailler avec les paramètres biotiques et abiotiques suivant : la température de surface de l'eau, la teneur en chlorophylle, la turbidité, la teneur en particules et en détritiques, tous obtenus par satellite (Volpe et al. 2020). La teneur en oxygène dissous, la production primaire et la salinité sont issus de modèles (Renshaw et al. 2019). Les données extraites pour ces huit paramètres sont étalées sur une plage temporelle d'une trentaine d'années (en moyenne), tandis que les données relatives aux habitats marins, également utilisées pour cette étude ne prennent pas en compte cette dimension temporelle.

#### i. Chlorophylle a et production primaire

La chlorophylle a et la production primaire sont deux paramètres sensiblement interdépendants. Ils permettent de documenter les dynamiques spatiales et temporelles des communautés phytoplanctoniques, regroupant l'ensemble des organismes appartenant au premier niveau des chaînes trophiques marines. La chlorophylle a est un pigment photosynthétique présent dans les organismes autotrophes marins, identifiable par satellite et dont la concentration peut être utilisée comme un proxy de la biomasse phytoplanctonique (Volpe et al. 2020). La production primaire désigne la production de biomasse par un organisme photoautotrophe (Napoléon et al. 2012). Elle dépend de la disponibilité des nutriments, de la quantité d'énergie lumineuse, de l'hydrodynamisme et des interactions trophiques (Napoléon et al. 2012).

#### ii. Turbidité, particules en suspension et détritiques

Les particules en suspension, les détritiques et la turbidité sont trois paramètres qui peuvent être étudiés en parallèle. Leur sélection dans le cadre de cette étude repose sur leur apport d'informations en termes d'influence des fleuves se déversant en baie de Seine, mais également en termes de potentielles pollutions côtières d'origine terrigène. Les particules en suspension comprennent la matière organique vivante, tandis que les détritiques se composent de la matière

organique dissoute (donc inerte), ainsi que de résidus d'origine continentale non vivant, comme des fragments de déchets par exemple.

Particules et détritits forment un obstacle aux rayons solaires qui sont alors réfléchis dans d'autres directions, et ne pénètrent ainsi pas jusqu'au fond de l'eau. Cette atténuation de la lumière entrante dans la masse d'eau est la turbidité (Boyd 2000). Les particules en suspension sont mesurées comme la fraction de lumière incidente qui est déviée de sa trajectoire d'origine. Son unité est le  $m^{-1}$  (Volpe et al. 2020). La turbidité est mesurée comme le coefficient d'atténuation de la lumière diffuse dans l'eau. Enfin la mesure de détritits consiste en un coefficient d'absorption du flux radiatif dans l'eau. Ces deux derniers paramètres sont également exprimés en  $m^{-1}$  (Volpe et al. 2020).

### iii. Salinité, température de surface de l'eau et oxygène dissous

L'oxygène dissous présent dans l'eau est indispensable à de nombreux organismes marins et ce à tous les niveaux du réseau trophique. Il intervient dans des processus biogéochimiques aussi variés et liés que la photosynthèse, la respiration aérobie ou la dégradation bactérienne. Son analyse au sein d'un écosystème apporte ainsi une importante quantité d'informations, aussi bien sur les processus biologiques que sur d'autres paramètres, tels que la température ou la salinité (Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval 2008, Nzigou 2012). La température de l'eau ayant une influence sur sa densité, elle influence donc également la salinité (Curriculum Research & Development Group (CRDG) 2020). Température et salinité ont été sélectionnées pour leur influence notable sur la structure des communautés (notamment l'impact de la salinité sur la survie des larves, ou encore l'influence de la température sur la croissance des organismes) (McLean et al. 2019). La salinité de surface a été obtenue à l'aide du modèle NEMO (pour Nucleus for European Modelling of the Ocean), dont le biais avec la climatologie réelle est de  $\pm 0.5$  PSU (Unité de Salinité Pratique) (Renshaw et al. 2019). La salinité est un facteur particulièrement influent sur les migrations d'espèces anadromes et catadromes notamment (Fernández-Delgado et al. 2007, Pezy et al. 2017).

### iv. Le substrat

Les données relatives aux substrats marins ont été extraites du portail EMODnet, et comportent des informations sur le type de sédiment. Cette classification des habitats européens a été opérée par l'Agence Européenne de l'Environnement et comporte plus de 5000 habitats différents, répartis en 10 ensembles de milieux, le premier étant « A. Habitats marins » (European

Environment Agency (EEA) 2020). Il s'agit donc de cartes statiques non dépendantes du temps. Six catégories de sédiments sont présentes dans ces données :

- Les sédiments grossiers : ce substrat se compose de sable grossier, de galets, de cailloutis ou de gravier. Ces sédiments sont susceptibles d'être perturbés, car ce substrat est particulièrement exposé à l'action des vagues et aux courants de marée (European Environment Agency (EEA) 2019a).
- Les sédiments hétérogènes : cette catégorie comprend aussi bien des sables graveleux et vaseux, que des galets, des coquilles ou de graviers, le tout dans un ensemble très peu trié (European Environment Agency (EEA) 2019b).
- Les roches et substrats durs : comme son nom l'indique, ce substrat soumis à un fort hydrodynamisme se compose de roches stables et de blocs particulièrement exposés à l'action des vagues et à de forts courants de marée (European Environment Agency (EEA) 2019c).
- Le sable : il s'agit de sable fin propre ou vaseux non cohésif, contenant entre 5 et 20% de limon ou d'argile (European Environment Agency (EEA) 2019d, 2019e).
- Vase sableuse : ce type de sédiment comprend les vases sableuses cohésives contenant au moins 20% de limon et d'argile et est généralement abrité, peu soumis aux courants de marées et aux vagues (European Environment Agency (EEA) 2019f).
- Fond marin : enfin, la catégorie « fond marin » regroupe les types de substrats qui ne figurent pas dans la classification, et sont donc très minoritaires.

## I.b. Les communautés biologiques

### i. Traits d'histoire de vie

On appelle « trait d'histoire de vie » les caractéristiques biologiques et physiologiques des espèces permettant de distinguer leurs modes de vie, leur stratégie de survie mais également leur réponse à un forçage environnemental (Napoléon et al. 2012). En outre, il est considéré que les espèces influencent directement les processus écologiques d'un milieu via ces traits (King and McFarlane 2003).

Les informations concernant les espèces benthiques ont été extraites du site BIOTIC (pour Biological Traits Information Catalogue) (MarLIN 2006). Pour ce qui est des espèces démersales, les données sont celles de Beukhof et al. (2019), qui renseignent les traits d'histoire de vie de 1702 taxons différents, identifiés lors de campagnes de chalutage internationales conduites régulièrement dans le nord de l'océan Atlantique notamment. Cette distinction entre espèces démersales et benthiques est rendue nécessaire par l'absence de base de données les réunissant.

Enfin, les statuts des espèces dans la liste rouge de l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) ont également été utilisées, et extraites du site de l'UICN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources 2020), car ces statuts permettent d'intégrer l'impact des activités anthropiques sur les organismes.

## ii. Densités de capture

Afin de travailler avec des informations temporalisées et régulières sur les communautés biologiques au sein de la baie de Seine, un jeu de données issu de la base DATRAS (pour Database of Trawl Surveys) créée par le Conseil International pour l'Exploration de la Mer (ICES) a été employé. Cette base recense toutes les données issues de campagnes scientifiques de chalutage à l'échelle européenne dans un but d'homogénéisation de l'information, de son accessibilité et utilisation pour les études scientifiques (Conseil International pour l'Exploration de la Mer).

La campagne scientifique CGFS (Channel Ground Fish Survey), réalisée annuellement par l'IFREMER depuis 1988 en Manche orientale, fait partie de ces campagnes (Coppin et al. 1988). Avec une moyenne de 90 traits de chalut par an, d'une durée d'une demi-heure chacun, il s'agit de l'unique campagne de ce type à échantillonner la Manche orientale, et permet ainsi de représenter ses 70 748 km<sup>2</sup> en termes d'espèces biologiques. A bord du navire océanographique, les captures sont identifiées, comptabilisées, pesées ou encore mesurées afin de construire une base de données la plus exhaustive possible, eu égard des difficultés de travail et des conditions climatiques fluctuantes (Coppin et al. 2009). La base a été filtrée sur la baie de Seine, sur laquelle on observe les caractéristiques suivantes : entre 15 et 32 traits de chaluts réalisés par an (Figure 3), 190 taxons différents, 32 années couvertes (1988-2019). Il est ainsi possible de visualiser la composition globale des communautés d'espèces dans la baie.

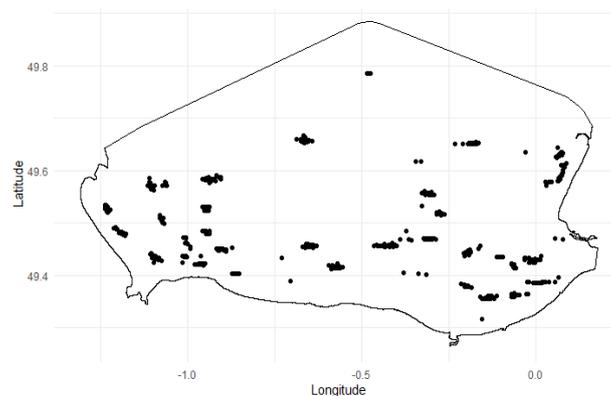


Figure 3. Carte des coups de chalut réalisés en baie de Seine durant la campagne CGFS, de 1988 à 2019.

## I.c. Les usages anthropiques

### i. Les législations en vigueur

Les différents usages anthropiques ont été documentés à partir des informations disponibles sur EMODnet. Il s'agit dans un premier temps des sites d'extraction et de dépôts de granulats marins. En termes de législation de protection, les sites classés Natura 2000 en mer ont été utilisées. De la même façon que pour les substrats marins précédemment cités (section Matériels et méthodes I.a), les données relatives à la législation consistent en des polygones fixes dans le temps, aucun traitement ne leur a été appliqué durant cette étude.

### ii. Densité d'occupation de l'espace marin

Les activités humaines modifient profondément le fonctionnement des écosystèmes marins (Halpern et al. 2019). Les navires contribuent à ces modifications par la pêche (via les prélèvements dans les communautés biologiques ainsi que les impacts des engins sur les fonds marins), par l'extraction de matériaux situés sur le fond (granulats, dragage), par les pollutions sonores et chimiques engendrées par le trafic maritime, etc. La quantification et la représentation de ces activités dans le cadre de la planification maritime spatiale demande de localiser précisément les navires concernés dans l'espace maritime. A l'échelle d'un navire, ce positionnement est effectué à l'aide des instruments de navigation. La collecte et la centralisation de ces informations à l'échelle de l'ensemble des navires occupant un espace maritime donné peut être effectué en utilisant les systèmes de surveillance maritime (Dupont et al. 2020). Ces systèmes incluent des transmetteurs embarqués (Automatic Identification System – AIS (Tetreault 2005); Vessel Monitoring System – VMS (Campbell et al. 2014)), des enregistreurs, de l'observation radar ou de l'imagerie (in situ, aéroportée ou satellite). La disponibilité de ces informations étant rare, le choix de cette étude se porte sur l'information mise à disposition par le portail EMODnet et faisant usage de l'AIS.

L'AIS est donc un système d'échanges automatisés de messages entre navires par radio VHF (Very High Frequency). Ces messages permettent la surveillance du trafic maritime en transmettant l'identité, le statut, la position et la trajectoire entre navires, stations terrestres (comme les phares) et bouées. Ce système a démontré son intérêt pour évaluer l'impact des activités humaines sur le milieu dans différents domaines : suivi des flottilles de pêche (Mazzarella et al. 2015, Natale et al. 2015, Vespe et al. 2016, Le Guyader et al. 2017, Kroodsmas et al. 2018), suivi et pollution sonore de la navigation de plaisance (Hermannsen et al. 2019) et suivi global du trafic maritime au sein d'une zone protégée (Coomber et al. 2016). De plus dans le cadre de la

planification maritime spatiale, l’AIS permet de représenter de manière synoptique l’ensemble du trafic maritime (Fiorini et al. 2016, Dupont et al. 2020).

EMODnet met ainsi à disposition le suivi AIS du trafic maritime européen de 2017 à fin 2019 (Falco et al. 2019). La typologie des navires suivis comporte 12 catégories, elles-mêmes regroupées en 5 classes. Il s’agit de :

- La pêche
- Le dragage
- Les services : ce groupe réuni les activités de service en mer (comprenant par exemple les transports médicaux ou encore les véhicules de recherche et de sauvetage), de remorquage et militaires (comme les navires de contrôle, de commandes)
- La plaisance : ce groupe réuni les activités de navigation à la voile et de plaisance à moteur (comme les yachts, les bateaux-musées ou les hôtels et restaurants flottants)
- Le transport : ce groupe réuni les activités de transport (passagers, cargos, transport rapide), tankers

Les données AIS sont extraites du portail « Human Activities » d’EMODnet, sous la forme de cartes mensuelles par catégorie de navires d’une résolution de 1000 m (Falco et al. 2019).

## II. Traitements analytiques

L’ensemble des traitements suivis durant cette étude ont été effectués avec le langage de programmation R sur le logiciel RStudio (RStudio Team 2020). Le principe général de ces traitements est explicité dans cette partie. Leur application sur les jeux de données, dans le cadre de l’étude, est présentée dans la partie suivante. Les codes et les données utilisées dans cette étude sont disponibles sur le dépôt git suivant : <https://github.com/ldbk/SeineMSP>, afin de suivre les corrections et apports de chacun, et à des fins de transparence et de diffusion des méthodes dans un cadre plus large.

### II.a. Vérification automatisée de la taxonomie

En raison de la constante évolution des conventions taxonomiques, il peut être nécessaire de vérifier la validité des noms d’espèces étudiées. Ainsi, WoRMS (World Register of Marine Species) propose des solutions pour travailler avec les taxonomies les plus actualisées possible (WoRMS Editorial Board 2019).

## II.b. Analyse des correspondances multiples

L'analyse des correspondances multiples (ou ACM), est une méthode statistique permettant d'analyser les relations entre des individus, selon les variables qualitatives qui les caractérisent. En transformant un jeu de données qualitatives en valeurs numériques, (tableau disjonctif complet ou table de Burt), elle permet la projection des individus dans un espace à  $n$  dimensions, à l'aide des composantes principales qui décrivent au mieux le jeu de données suivant les contraintes analytiques (maximisation des variances expliquées et orthogonalité des composantes). La matrice contenant les coordonnées des individus sur chaque axe peut alors être employée pour des analyses postérieures, de groupement notamment (Husson et al., Kakaï et al. 2016).

## II.c. Imputation des données

Certains traitements statistiques sur R nécessitent des tables de données complètes, sans aucune valeur manquante. Il peut arriver cependant que le jeu de données utilisé dans le traitement statistique soit lacunaire. L'intérêt de cette étape est donc le remplissage d'une table aux valeurs manquantes à l'aide de valeurs qui ne changent pas significativement les résultats des traitements suivants. Afin d'obtenir ces valeurs sans poids pour l'analyse, l'imputation prend en compte les similarités entre individus et les liens entre variables. Ce remplissage a pour unique fonction le bon déroulement des algorithmes.

## II.d. Classification ascendante hiérarchique

La classification (ou partitionnement) requiert la création d'une matrice des distances entre des individus comme point de départ de l'analyse. Celle-ci peut être obtenue par ACM. La classification ascendante hiérarchique (ou CAH) est une méthode permettant de former un certain nombre de clusters, en fonction de la distance séparant chacun des points (chaque point représentant un individu dans l'espace à  $n$  dimensions cité en section Matériels et méthodes II.b). Dans ce rapport, toutes les matrices de distances seront calculées en utilisant la distance Euclidienne. Le résultat de la classification est présenté par un dendrogramme, lequel présente les différents partitionnements possibles, du plus fin (chaque individu constitue un cluster), au plus grossier (l'ensemble des individus forment un cluster unique). Chaque dendrogramme est caractérisé par un « Coefficient d'agglomération », variant de 0 à 1 et indiquant la qualité du partitionnement (les valeurs proches de 1 étant gage de qualité (Greenwell and Boehmke 2020)). De nombreux packages R permettent de déterminer le partitionnement optimal, autrement dit le nombre de clusters décrivant le mieux le jeu de données (Husson et al., Kakaï et al. 2016).

## II.e. Optimisation de la classification : comparaison des méthodes d'agrégation

Il existe plusieurs façons de partitionner un ensemble d'individus en plusieurs sous-groupes, suivant les objectifs du partitionnement. Autrement dit, une classification dépend d'un certain nombre de critères d'agrégation, et est donc choisie suivant la nature des groupes, ou clusters, que l'on souhaite obtenir. Par exemple, si l'objectif est d'obtenir des clusters de tailles relativement égales, la méthode de classification à privilégier ne sera pas la même que si l'objectif est d'obtenir des clusters très homogènes (Hennig 2017). Dans le cas de cette étude, l'objectif de la classification est d'obtenir des clusters d'objets similaires au sein d'un groupe. De fait, la démarche de comparaison des algorithmes d'agrégation appliquée a avant tout pour intérêt de découvrir cette approche, et n'a donc pas été suivies sur tous les jeux de données à classifier durant cette étude. Le choix de la méthode s'est finalement porté sur celui répondant de façon satisfaisante à 4 indices de partitionnement. Deux relatifs à l'homogénéité au sein des clusters, et deux autres relatifs à l'hétérogénéité entre les clusters. Les résultats de cette analyse peuvent être visualisés en Annexes 7 et 8. Le choix de la méthode d'agrégation s'est ainsi porté sur le critère de Ward, qui sera alors utilisé pour l'ensemble des classifications de cette étude.

## II.f. Krigeage

Les protocoles d'échantillonnage, comme ceux des données de campagnes scientifiques en mer, ne peuvent fournir des informations sur une grande zone spatiale de manière continue. Ces protocoles suivent en général des stations ou transects au cours du temps. Il est cependant possible de déterminer les informations manquantes, et ainsi définir une grille régulière de valeurs, à l'aide d'une méthode géostatistique : le krigeage (Petitgas, P.; Woillez, M.; Renard, D.; Bez, N.; And Rivoirard, J. 2017). Celle-ci consiste en l'interpolation de données sur une grille à l'aide des informations déjà échantillonnées. La démarche tient sur le calcul d'une corrélation entre la distance spatiale qui sépare deux stations et la valeur de la variable à interpoler. Cette corrélation prend la forme d'un variogramme. Celui-ci fournit une relation mathématique entre la variance de la variable,  $y$ , en fonction d'une distance spatiale  $x$ . Des packages R permettent de déterminer la relation mathématique décrivant au mieux l'allure de ce variogramme. La courbe de cette relation mathématique permet alors d'obtenir une valeur pour chaque distance séparant les points entre eux, autrement dit une valeur pour chaque point géographique de la baie (Petitgas, P.; Woillez, M.; Renard, D.; Bez, N.; And Rivoirard, J. 2017).

### III. Analyses

#### III.a. Les paramètres environnementaux

##### i. Analyses individuelles des données satellitaires

Comme explicité en section Matériels et méthodes I.a, huit paramètres environnementaux ont été sélectionnés. Nous disposons d'informations sur une plage temporelle différente pour chacun d'eux, mais relativement équivalente, d'une trentaine d'années en moyenne. S'agissant d'images satellitaires, la baie de Seine est découpée selon une grille composée de carrées de tailles égales : les pixels. Chacun d'eux est défini par une valeur (dans l'unité du paramètre en question, Annexe 1), une longitude, une latitude, et une date, celle de capture de l'image satellitaire. Nous disposons d'informations mensualisées pour les huit paramètres.

Le premier traitement appliqué à chacun des paramètres est l'agrégation des données mensuelles en données annuelles en calculant les moyennes. A ce stade les paramètres environnementaux sont donc distribués en 30\*8 cartes moyennes annuelles aux valeurs continues (Annexe 2). Afin de résumer une première fois l'information environnementale, chacun des 8 sets de 30 cartes passe par une CAH. En effet les individus que l'on cherche à regrouper (section Matériels et méthodes II.d) sont désormais des pixels caractérisés par une série temporelle annuelle. Afin de comparer les pixels entre eux, un calcul de distances comme explicité en section Matériels et méthodes II.d est effectué, à l'aide du package stats sur R (R Core Team 2020).

Cette matrice est alors traitée par CAH, avec le package R cluster (Maechler et al. 2019). Une fois le dendrogramme obtenu (un par paramètre environnemental), le package NbClust permet de suggérer le découpage optimal de chaque arbre de classification (Charrad et al. 2014). Ces dendrogrammes sont présentés en Annexe 3. Pour chaque paramètre, les pixels ne sont désormais plus caractérisés par une valeur continue, mais par une valeur correspondant à une zone de pixels dont les séries temporelles sont similaires. Une zone est ainsi composée d'un certain nombre de pixels rassemblés ensemble de par leur proximité en terme de valeurs, mais également en termes d'évolution de ces valeurs dans le temps. Chaque zone est ainsi considérée comme homogène pour le paramètre considéré. On obtient ainsi 8 cartes de partitionnement, une par paramètre.

##### ii. Regroupement des paramètres environnementaux

Précédemment, les pixels ont été traités paramètre par paramètre. Les valeurs prises par chaque pixel sont donc qualitatives, (la zone 1 pour le paramètre chlorophylle a est une étiquette différente de la zone 1 du paramètre turbidité, etc.). Afin de les comparer, il est donc nécessaire de réaliser une ACM (section Matériels et méthodes II.b). Le package FactoMineR a été utilisé (Le

et al. 2008). Le nuage de points résultant de l'ACM sur les paramètres environnementaux est présenté en Annexe 5. La matrice des distances obtenue est alors traitée par CAH (de nouveau à l'aide des packages Cluster et NbClust) afin d'obtenir une classification prenant en compte les huit paramètres. Le dendrogramme qui en résulte est présenté en Annexe 4. La baie de Seine se retrouve désormais découpée en plusieurs zones dans lesquelles ces paramètres environnementaux sont considérés et leur évolution dans le temps est homogène.

### III.b. Les communautés biologiques

Plusieurs analyses ont dû être menées sur les données halieutiques, dans un premier temps afin de résumer l'information et faciliter ainsi l'interprétation des résultats. C'est ce qui est mené avec les traits fonctionnels, tout d'abord pour réduire le nombre d'entités biologiques considérées et ensuite par krigeage, afin d'obtenir des informations sur l'ensemble de la baie, comparable ainsi aux données environnementales.

#### i. Regroupement par les traits d'histoire de vie

Comme mentionné précédemment, la base de données DATRAS à partir de laquelle est étudiée la structure des communautés est composée de 190 taxons différents. La création de cartes et leur interprétation pour chacun d'eux étant n'étant pas gérable, ils ont été regroupés. Un tel regroupement peut s'effectuer selon différentes logiques. Le public visé dans le cadre de notre étude étant des gestionnaires, il a paru pertinent de rassembler les espèces suivant leur sensibilité à l'effort de pêche. Partant des travaux d'Andonegi et al. (2016), de ceux de Greenstreet et al. 2012 et suivant la disponibilité des informations en ligne, le choix de traits a été finalisé, comme le résume le tableau 1.

*Tableau 1 : Ensemble des traits sélectionnés pour les taxons démersaux et benthiques.*

| Taxons démersaux                        | Taxons benthiques                          |
|---|--|
| L'âge d'arrivée à maturité              | L'âge d'arrivée à maturité                 |
| Le coefficient de croissance            | La longévité                               |
| La longévité maximale                   | La sociabilité                             |
| La taille maximale                      | Le type de fertilisation                   |
| Le niveau dans le réseau trophique      | La fréquence de reproduction               |
| La position dans la colonne d'eau       | Le comportement migratoire                 |
| Le régime alimentaire                   | La sédentarisation (vie attachée ou libre) |
| Le statut dans la liste rouge de l'UICN |  |

Avant de croiser les informations de traits fonctionnels avec la liste de taxons issue des campagnes CGFS, il a été jugé pertinent d'effectuer une vérification de la taxonomie comme explicité dans la section Matériels et méthodes II.a, et ce sur la liste de taxons des travaux de (Beukhof et al. 2019), de BIOTIC, et de DATRAS. Le package worms a ainsi été utilisé (Holstein 2018). Etant donnée l'imperfectibilité des connaissances en écologie des communautés, certaines informations ne sont pas disponibles pour chaque trait et/ou pour chaque taxon. Pour cette raison, les tables obtenues (une table pour les espèces démersales, et une autre pour les espèces benthiques, structurées avec les taxons en lignes et les traits en colonnes), sont incomplètes. Il a ainsi été nécessaire de réaliser une imputation des données, à l'aide du package R mice (Van Buuren and Groothuis-Oudshoorn 2011).

Chaque taxon est à ce stade caractérisé par un certain nombre de variables (8 traits pour les espèces démersales et 7 pour les espèces benthiques) qualitatives et quantitatives. En raison de la double nature des traits considérés, il a été choisi de catégoriser les variables quantitatives, afin de ne travailler qu'avec des variables qualitatives pouvant être traitées par ACM. Le nuage de points résultant de l'ACM sur les taxons démersaux est présenté en Annexe 6. Les deux matrices de distances ainsi obtenues sont alors traitées par CAH, ce qui résulte en un regroupement des espèces en un nombre restreint de « communautés », comme on les qualifiera par la suite. Les dendrogrammes résultant de ces deux CAH sont présentés en Annexes 9 et 10.

La comparaison des méthodes d'agrégation explicitée en section Matériels et méthodes II.e a été effectuée sur les tables de traits fonctionnels pour les taxons benthiques et pour les taxons démersaux, à l'aide du package fpc (Hennig 2020). Ces résultats sont présentés en Annexes 7 et 8.

## ii. Interpolation des densités de capture

L'échantillonnage de la CGFS (Figure 3) est tel qu'il est nécessaire d'interpoler les données de densités des communautés biologiques afin d'obtenir des données sur l'ensemble de la baie. Pour cette raison, il a été nécessaire de procéder à un krigeage (section Matériels et méthodes II.f). Chaque pixel possède après analyse une valeur de densité de capture interpolée (passée au logarithme de base 10 afin de standardiser les valeurs et obtenir des variogrammes exploitables), pour chaque communauté, et ce sur chacune des 32 années de campagne (Annexe 13). Le package utilisé est RGeostats (MINES ParisTech / ARMINES 2020). Les variogrammes et modèles mathématiques associés à chaque communauté est présenté en Annexe 12.

### iii. Analyses individuelles

A ce stade, chaque communauté d'espèces possède donc une série temporelle (de longueur identique, égale à 32 années) des densités de captures sur la baie de Seine. Ces valeurs étant quantitatives, une CAH est réalisée, afin de regrouper les pixels et obtenir une zonation de la baie. Les dendrogrammes correspondants à chacune des neuf CAH sont présentés en Annexe 14. Comme pour les paramètres environnementaux, le résultat est donc une carte zonée par communauté. Le package utilisé pour ces classifications est fastcluster (Müllner 2013). Celui-ci ne permet pas d'obtenir le coefficient d'agrégation associé au partitionnement, contrairement au package cluster utilisé précédemment (section Matériels et méthodes III.a), mais a été privilégié pour le partitionnement des communautés pour accélérer les traitements.

### iv. Regroupement des communautés

Chaque pixel est désormais caractérisé par une valeur de zone, et ce pour chaque communauté. Une nouvelle fois, la nature de l'information caractérisant le pixel étant qualitative, leur représentation dans l'espace à travers une ACM est nécessaire, afin de les caractériser par une distance pouvant être traitée par CAH. Cette représentation dans l'espace est visible en Annexe 17, et le dendrogramme résultant de la CAH en Annexe 16. Une cartographie unique de la baie de Seine est obtenue, découpée en plusieurs zones dans lesquels la faune étudiée est structurée de façon homogène.

## III.c. Les usages anthropiques

### i. Obtention des cartes annuelles

Contrairement aux données environnementales, la plage temporelle pour laquelle on dispose d'informations sur les densités de navires est très restreinte (3 ans seulement). La considération de la temporalité dans la classification n'est donc pas aussi évidente que pour les facteurs précédents (environnement et biologie). L'évolution des densités de navires pour chaque activité (section Matériels et méthodes I.c), visible en Annexe 20, a été jugée suffisamment stables sur ces trois années pour qu'une moyenne des valeurs soit calculée. En résulte ainsi une carte unique de valeurs continues pour chaque activité.

## ii. Régionalisation finale

Les valeurs prises par chacun des pixels étant quantitatives, une CAH est réalisée sur l'ensemble des cartes des activités anthropiques considérées. Le dendrogramme qui en résulte est présenté en Annexe 19. Une nouvelle fois, la baie de Seine est zonée sous-groupes homogènes en termes d'activités anthropiques.

# Résultats

## I. Paramètres environnementaux

### I.a. Classifications individuelles

Le partitionnement des paramètres environnementaux séparément a permis une première régionalisation de la baie de Seine, comme présentée en Figure 4. Tous les paramètres ne font pas une partition fine de la zone d'étude et l'algorithme d'optimisation du groupement a mis en avant entre 2 et 3 groupes maximum. L'estuaire de la Seine apparaît à chaque fois comme étant un espace distinct du reste de la baie, avec des gradients en oxygène dissous et salinité marqués. Les détritiques, la chlorophylle a et la turbidité distinguent tous les trois la frange côtière du sud de la baie et la baie des Veys, dans une même zone (détritiques) ou deux (chlorophylle a et turbidité), indiquant qu'il existe une zone environnementale distincte en baie de Seine occidentale également.

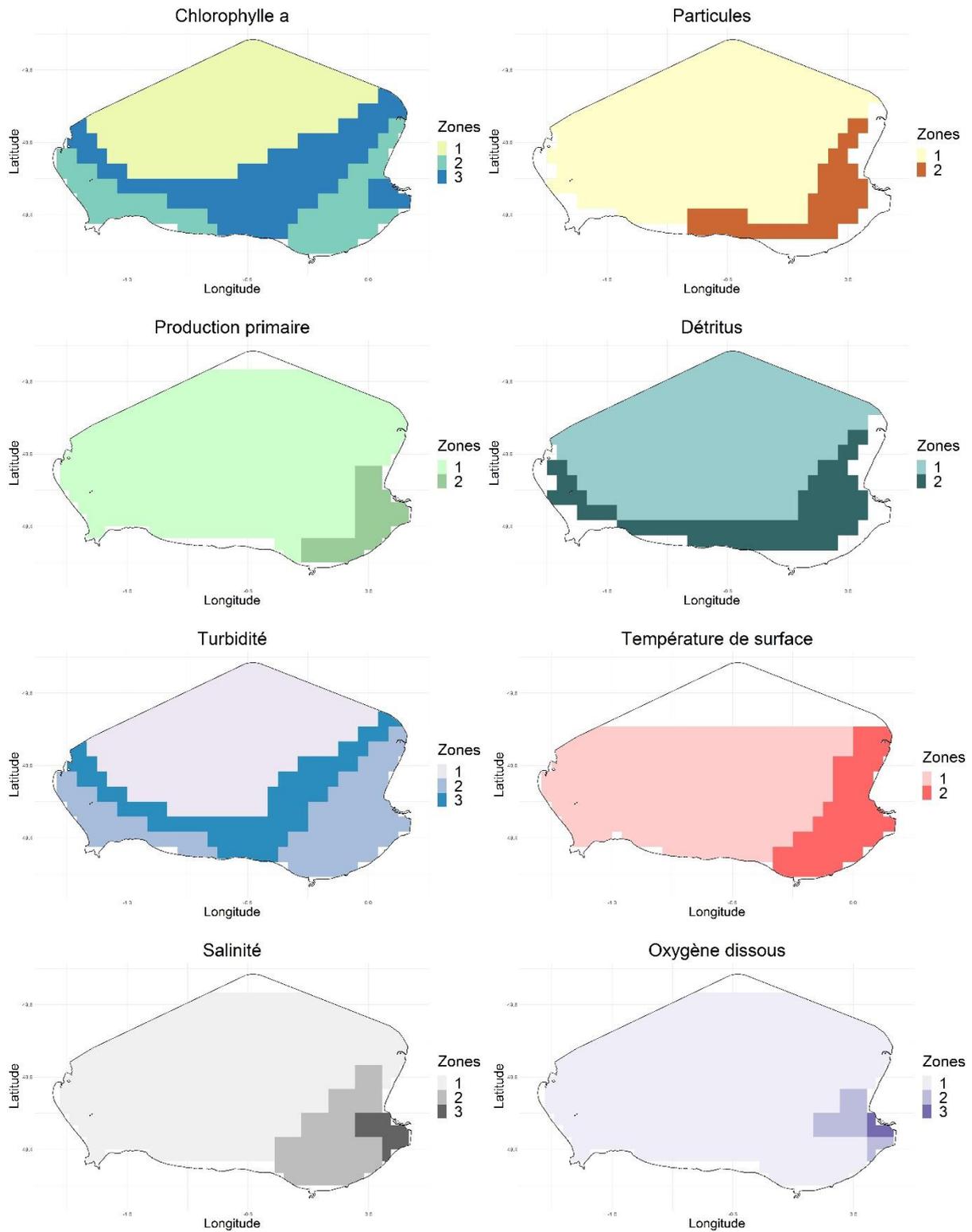


Figure 4. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats des classifications pour chaque paramètre environnemental. Les zonations sont propres à chaque paramètre et sont issues d'une classification des séries temporelles des valeurs par pixels.

## I.b. Régionalisation finale

La classification de l'ensemble des huit paramètres a permis l'obtention de la régionalisation présentée en Figure 5. Cette régionalisation résume les différentes zones obtenues par les classifications individuelles avec 6 zones déterminées par l'optimisation du groupement. L'estuaire de Seine et la baie de Seine orientale forment 3 des 6 zones avec de forts gradients environnementaux. La baie des Veys à l'ouest constitue une zone à part entière. Enfin les 2 dernières zones sont le centre de la baie de Seine et une zone de transition entre celle-ci et la côte.

La figure 6 permet d'appréhender le profil de chaque zone. Ainsi, la zone 6 correspondant au centre de la baie puis la zone 1 sont celles pour lesquelles les valeurs sont les plus faibles pour tous les paramètres excepté la salinité. En outre, ce sont les deux zones pour lesquelles les valeurs sont les moins étalées autour de la médiane, donc les moins variables. A l'opposée, la zone présentant les valeurs les plus élevées est la cinquième, au plus proche de l'estuaire de Seine. Les paramètres détritiques, oxygène dissous, particules et production primaire, soit 4 paramètres parmi les 8 ont leurs valeurs maximales dans cette zone. C'est ensuite la zone 2, soit le littoral est qui présente des valeurs élevées.

Ce résultat permet de constater que le paramètre température de surface n'est pas l'indicateur le plus discriminant pour effectuer une zonation, puisque les valeurs sont relativement équivalentes sur l'ensemble de la baie. La mise en parallèle des boîtes à moustaches des paramètres particules, détritiques, production primaire et oxygène dissous dégage des tendances équivalentes : pour chacun de ces quatre paramètres, l'ordre croissant des valeurs est le suivant : zone 6, zone 1, zone 3, zone 2, zone 4, zone 5. De même, les paramètres chlorophylle a et turbidité présentent des boîtes aux tendances semblables. La salinité est le paramètre (mis à part la température de surface) pour lequel les extrêmes de valeurs sont opposés à tous les autres.

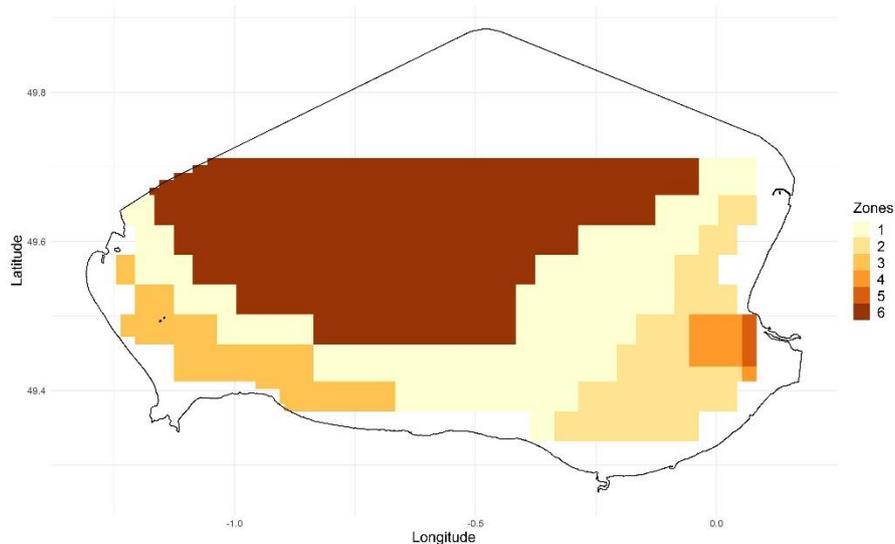


Figure 5. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des paramètres environnementaux.

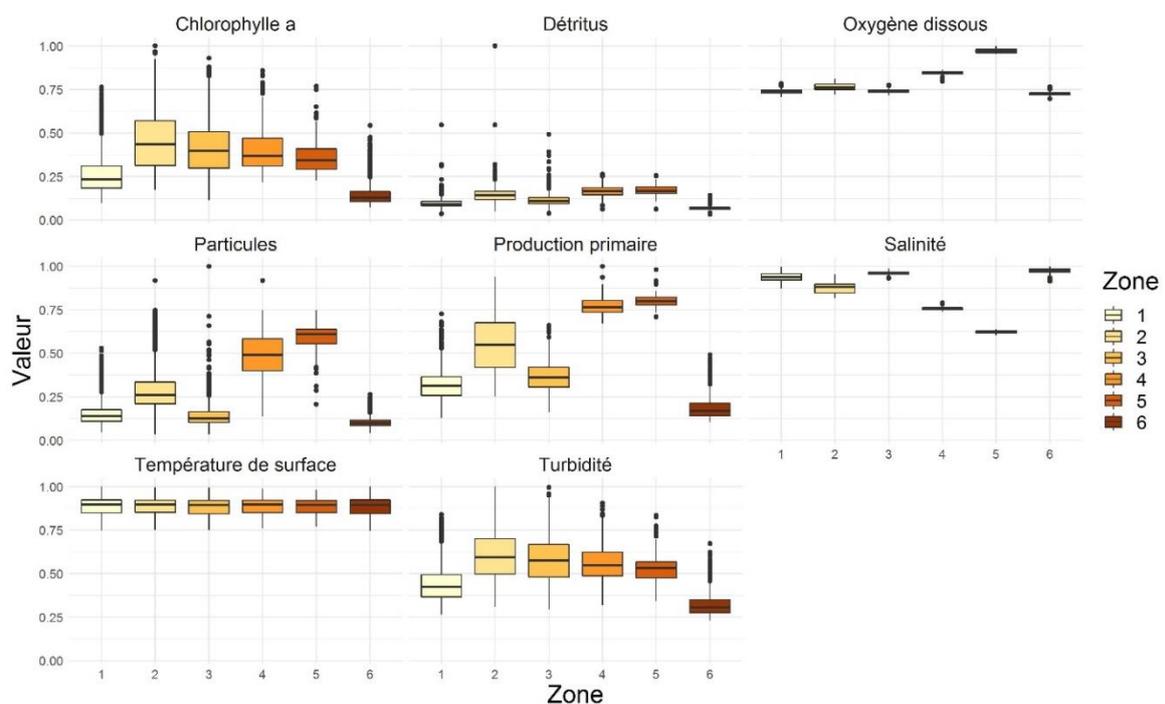


Figure 6. Boîtes à moustaches des conditions environnementales dans chaque zone de la baie de Seine, en fonction des valeurs maximales qui y sont observées.

### I.c. Les substrats

On peut constater sur la carte des substrats en baie de Seine (Figure 7), que les sédiments grossiers dominent majoritairement. En seconde position en terme de superficie, on trouve le sable qui occupe une large zone du côté sud-ouest de la baie ainsi qu'au niveau de la baie des Veys. Ces deux zones ne sont pas complètement homogènes puisque des zones plus petites de sédiment

vaseux, grossiers ou rocheux s'en distinguent. La catégorie de sédiments mixtes (section Matériels et méthodes I.a pour plus de détails) est très peu représentée, témoignant de la relative constance de la distribution des sédiments au sein de la baie. Enfin, des rochers ou substrats durs sont présents en côtes ouest et sud uniquement, sur des surfaces minimales en comparaison aux autres sédiments.

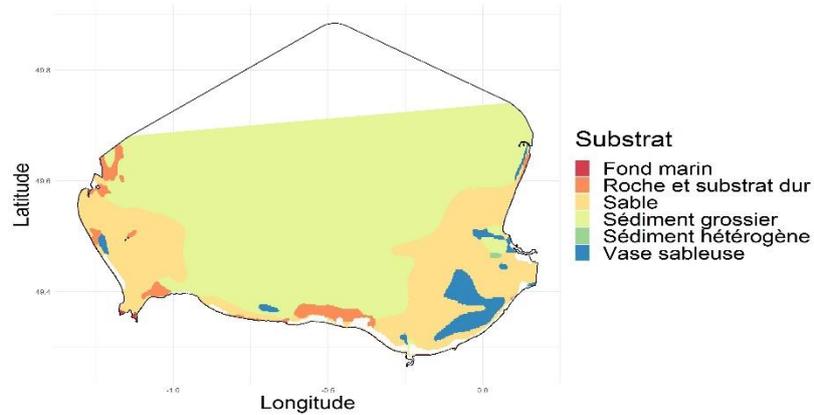


Figure 7. Cartographie des substrats marins en baie de Seine.

## II. Communautés biologiques

### II.a. Regroupement des espèces

Après vérification taxonomique, la liste de taxon issue de DATRAS s'élève à 184 taxons. Nous avons alors pu associer les informations issues des deux bases d'informations BIOTIC et les travaux de (Beukhof et al. 2019) à la liste de taxons présents en baie de Seine. En est ressorti le bilan suivant :

- 89 taxons ont été retrouvés dans les travaux de (Beukhof et al. 2019), et représentent alors des espèces démersales
- 31 taxons ont été reconnus par la base de données BIOTIC, et représentent alors des espèces benthiques
- 7 taxons non reconnus ont été regroupés manuellement, il s'agit de céphalopodes
- 52 taxons identifiés pendant la campagne ne disposent d'aucune information de traits d'histoire de vie disponibles en ligne, ils sont laissés de côté pour la suite de l'étude.

A ce stade nous disposons ainsi d'informations biologiques (traits) et halieutiques (densités de capture) pour 120 espèces présentes en baie de Seine, ainsi que d'informations halieutiques seulement pour 7 espèces de céphalopodes. Les ACM réalisées sur les deux groupes (démersal et benthique), ont résulté en l'obtention de nuages de points tel que présenté en Figure 8, pour les espèces benthiques. Le nuage de point résultant de l'ACM sur les taxons démersaux est présenté

en Annexe 6. Ces ACM expliquent respectivement pour le benthos et les démersaux 55.7% et 39.7% de la variance totale.

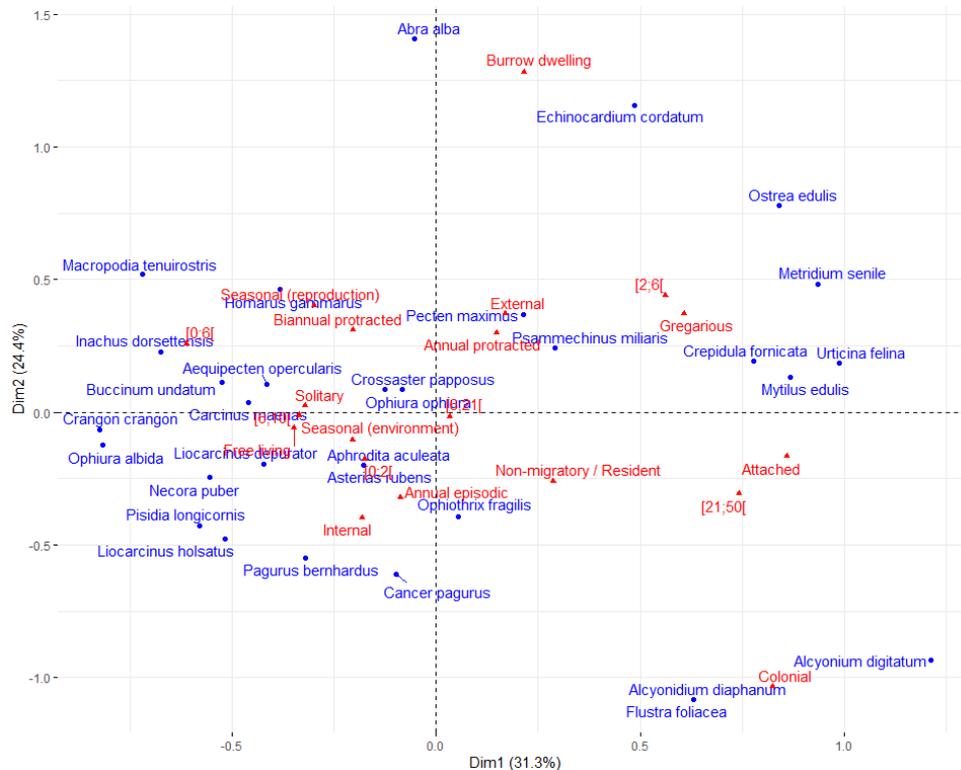


Figure 8. Nuages de points issu de l'ACM, représentant les différentes espèces benthiques ainsi que les modalités des sept variables les caractérisant, dans un espace à deux dimensions.

Les coordonnées de chacun des taxons dans l'espace, ont permis le partitionnement des deux groupes en 8 clusters : 4 communautés d'espèces démersales et 4 d'espèces benthiques. La composition des communautés et leurs caractéristiques principales sont explicitées dans le tableau 2 ainsi qu'en Annexe 11.

La communauté I est caractérisée par la présence d'un certain nombre d'espèces à fort intérêt commercial. La communauté II quant à elle présente des taxons dont le maintien dans l'écosystème est fragile. En effet, leur statut IUCN est « vulnérable » (*Gadus morhua*, *Scophthalmus maximus*), « en danger » (*Leucoraja circularis*, *Raja undulata*) voire « en danger critique » (*Anguilla anguilla*). La communauté III a l'effectif le plus important. Ses espèces se reproduisent rapidement, mûrent tôt et ont une croissance élevée. La communauté V est caractérisée par son besoin de se fixer sur un substrat, tout comme la communauté VII. Il y a néanmoins une distinction entre ces deux groupes puisque la communauté VII est composée d'espèces coloniales, alors que la V est plutôt grégaire. La communauté VI quant à elle regroupe un certain nombre d'espèces benthiques, qui ne présentent pas de caractéristiques communes

évidentes. Certaines comme le homard (*Homarus gammarus*), ont plutôt besoin de substrat rocheux, alors que d'autres comme les crabes (*Cancer pagurus*, *Pisidia longicornis*) se retrouvent davantage sur un substrat meuble. Elle comprend 2 des 7 espèces les plus commercialisées en Normandie, il s'agit de la coquille Saint Jacques (*Pecten maximus*) et du buccin (*Buccinum undatum*). La communauté VIII est composée de deux taxons seulement qu'on pourrait qualifier d'indicateurs, puisqu'ils sont retrouvés dans des habitats sableux, fins, voire vaseux, souvent indicateurs d'une présence humaine. Elle est composée des deux seules espèces qui selon la base BIOTIC creusent des tranchées et s'enfouissent complètement dans le sédiment.

Tableau 2. Caractéristiques principales des différents groupes d'espèces résultant de la classification.

| Communauté | Effectif | Caractéristiques principales   | Taxons caractéristiques  |
|------------|----------|--|--|
| I          | 25       | Généralistes ou benthivores, niveau trophique moyen à élevé, croissance faible à moyenne, longévité élevée, statut IUCN de moindre préoccupation, taille maximale faible à moyenne |  |
| II         | 12       | Âge d'arrivée à maturité élevé, niveau trophique moyen à élevé, croissance faible à moyenne, taille moyenne à élevée, longévité élevée, statut IUCN préoccupant                    | <i>Conger conger</i><br><i>Gadus morhua</i>  |
| III        | 45       | Taille faible, âge d'arrivée à maturité faible à moyen, niveau trophique faible à moyen, longévité faible à moyenne  | <i>Gobius gasteveni</i><br><i>Ammodytes tobianus</i><br><i>Ammodytes tobianus</i><br><i>Engraulis encrasicolus</i> |
| IV         | 7        | Piscivores, niveau trophique moyen à élevé, taille faible à moyenne  |  |
| V          | 6        | Vivent attachés, longévité moyenne à élevée, grégaires, fertilisation externe, non-migratoires   | <i>Crepidula fornicata</i><br><i>Ostrea edulis</i>   |
| VI         | 20       | Âge d'arrivée à maturité faible, longévité moyenne, vivent librement, solitaires, migratoires (aussi bien pour des raisons environnementales que pour la reproduction)             | <i>Pecten maximus</i><br><i>Buccinum undatum</i><br><i>Homarus gammarus</i>  |
| VII        | 3        | Vivent attachés, coloniaux, fertilisation interne, reproduction annuelle épisodique, non-migratoires   |  |
| VIII       | 2        | Fouisseurs   | <i>Echinocardium cordatum</i>  |

Le groupe des céphalopodes créé manuellement comporte lui 7 taxons différents.

## II.b. Variogrammes et krigeage

Les valeurs de densité de capture ont ainsi été interpolées par krigeage pour chaque communauté d'espèce. Les résultats présentés dans les Figure 9, Figure 10 et Figure 11 sont ceux de la communauté biologique II, mais le traitement s'est avéré identique pour toutes les autres. Les variogrammes sont calculés pour chaque année de campagne et standardisés afin de pouvoir calculer le variogramme moyen de la communauté (Figure 9). Ce variogramme est ensuite utilisé pour ajuster le modèle mathématique nécessaire au krigeage afin de calculer les densités en tout point de la grille (Figure 10).

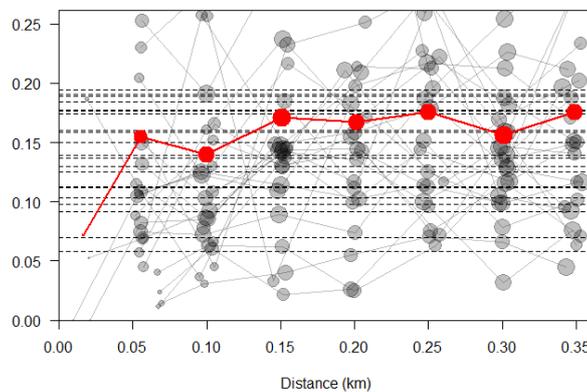


Figure 9. Ensemble des variogrammes entre 1988 et 2019 (noir) et variogramme moyen (rouge) de la communauté II.

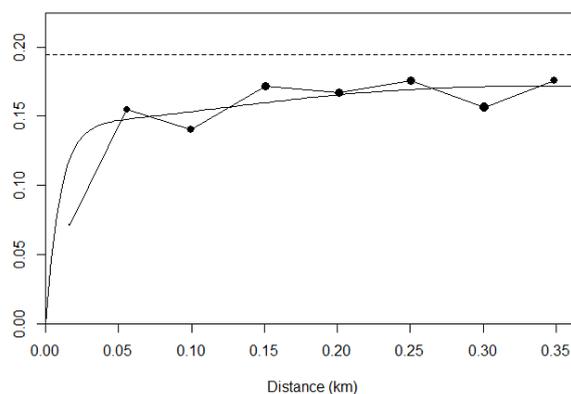


Figure 10. Ajustement du modèle mathématique le plus adapté au variogramme moyen de la communauté II.

A partir de ce modèle peuvent être calculées les différentes valeurs de densités pour chaque point géographique, comme on peut le voir en Figure 11. Les valeurs correspondent au logarithme de

base 10 calculées sur les valeurs de densités, initialement en nombre d'individu par kilomètre carré.

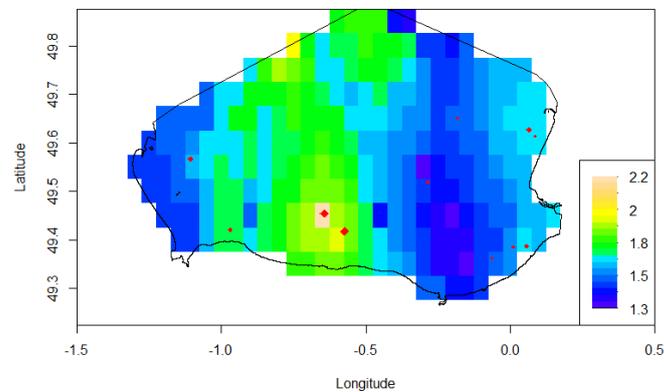


Figure 11. Cartographie des valeurs de krigeage estimées pour la communauté biologique II, l'année 1996. Les points rouges correspondent aux traits de chalut dont la taille est proportionnelle à la densité de capture correspondantes.

Le cas de la communauté II permet de distinguer une zone de moyenne densité au centre de la baie, de la côte jusqu'au large (zone verte), en parallèle de zones de plus faible densité à l'Est et à l'Ouest.

### II.c. Classifications individuelles

Le résultat des classifications pour chaque communauté est présenté en Figure 12. Le partitionnement est plus complexe que pour les paramètres environnementaux puisque le nombre de groupes ici varie entre 2 et 6. Suivant les communautés, la baie de Seine est parfois considérée comme une zone assez homogène (c'est le cas pour les communautés I, III, VII, VIII ou IX), alors que pour d'autres elle est fragmentée en plusieurs grandes sous-régions (notamment dans le cas des communautés II, IV, V ou VI). De la même façon que pour les paramètres environnementaux (section Résultats. I), la baie des Veys se distingue, pour les communautés II, V et VI seulement. L'estuaire de Seine et celui de l'Orne ne ressortent plus aussi nettement qu'en utilisant le facteur environnemental. Le littoral est de la baie constitue une zone à lui tout seul dans la classification de la communauté III uniquement. Bien que la classification dont résulte le plus de zones distinctes soit celle de la première communauté, on peut constater que seuls des pixels très particuliers constituent ces zones, si bien que finalement, la baie est globalement homogène sur l'ensemble de sa superficie. L'Annexe 15 permet de mieux cerner l'évolution des communautés dans chaque zone de la baie, suivant le résultat de leur CAH.

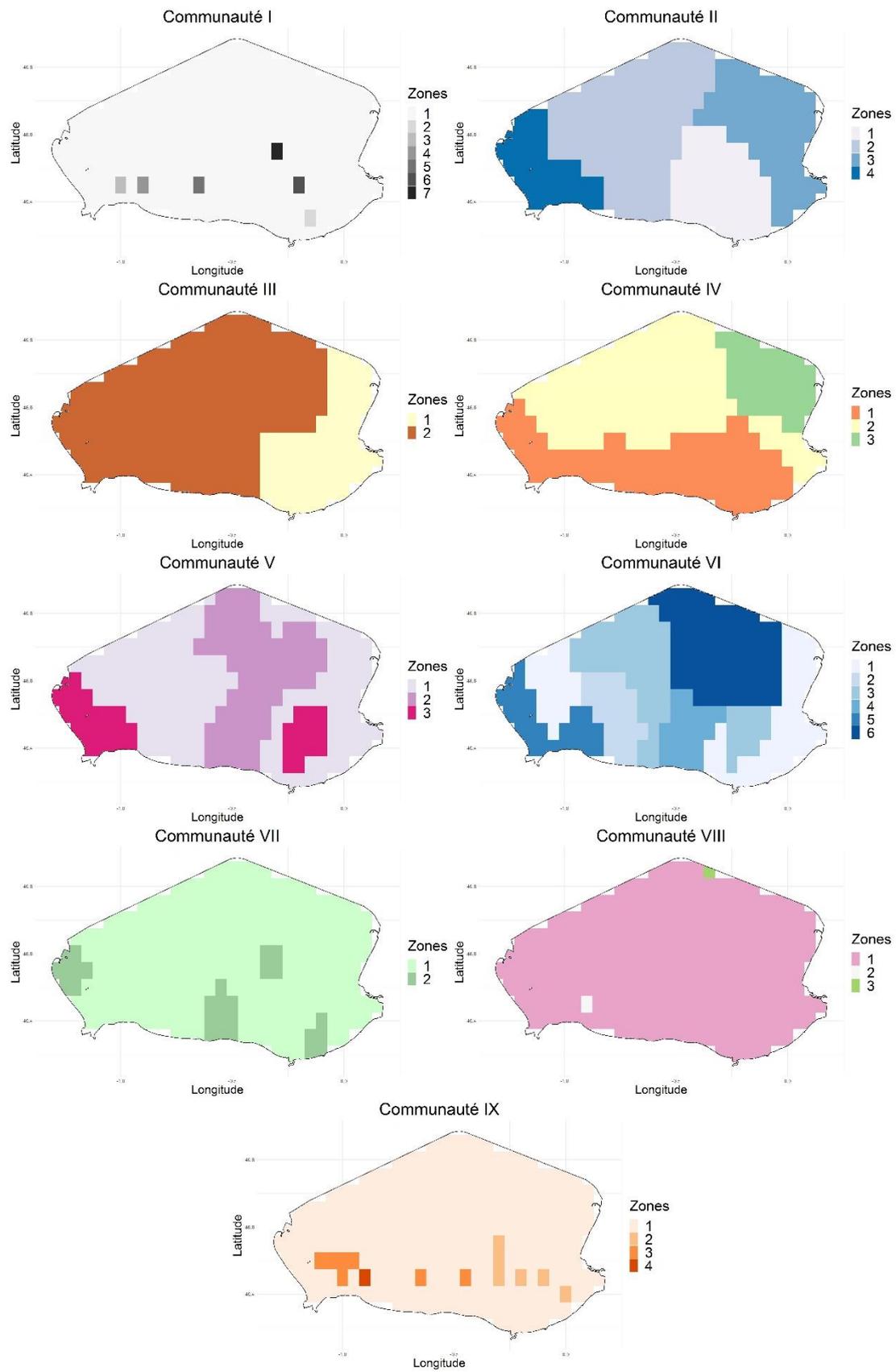


Figure 12. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats des classifications pour chaque communauté biologique.

## II.d. Régionalisation finale

Le résultat de la classification sur l'ensemble des communautés est présenté en Figure 13. Le groupement ici se découpe de manière optimale en 9 zones. Leurs tailles sont une nouvelle fois très variées puisque pour certaines (zones 9, 7, 6 et 4) seuls des pixels très localisés ressortent là où d'autres permettent de régionaliser la baie des Veys (zone 5), la côte Est (zone 1) ou encore deux sous-régions du reste de la baie (zones 2 et 8). La composition de chaque zone en termes de communauté biologique, ainsi que leur évolution dans le temps sont présentés dans des séries temporelles en Annexe 18. A noter que les pixels particuliers ici sont ceux observés dans les classifications des communautés I, IX et en moindre mesure VIII.

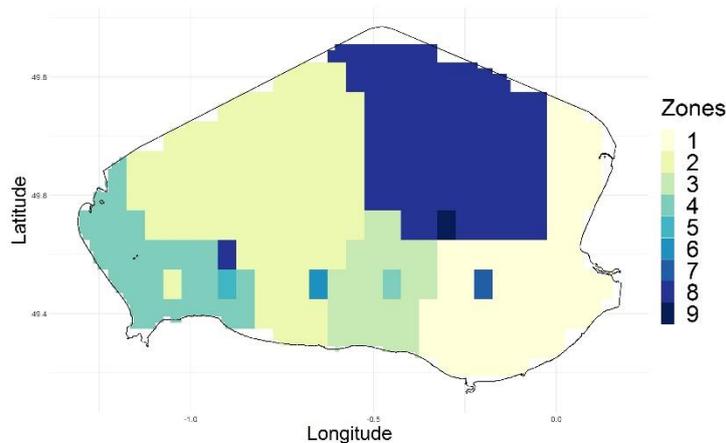


Figure 13. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des communautés biologiques.

## III. Usages anthropiques

### III.a. Législation

La figure 14, présentant les différentes législations en vigueur en baie de Seine montre que les zones d'extraction de granulats sont en faible quantité (2% de la superficie totale de la zone d'étude). Ces sites sont principalement en sortie du port du Havre et au large, au nord de la zone étudiée. Des sites Natura 2000 existent dans la baie des Veys, la baie de Seine orientale et l'estuaire de Seine. Ces zones recouvrent 23% de la surface étudiée en baie de Seine.

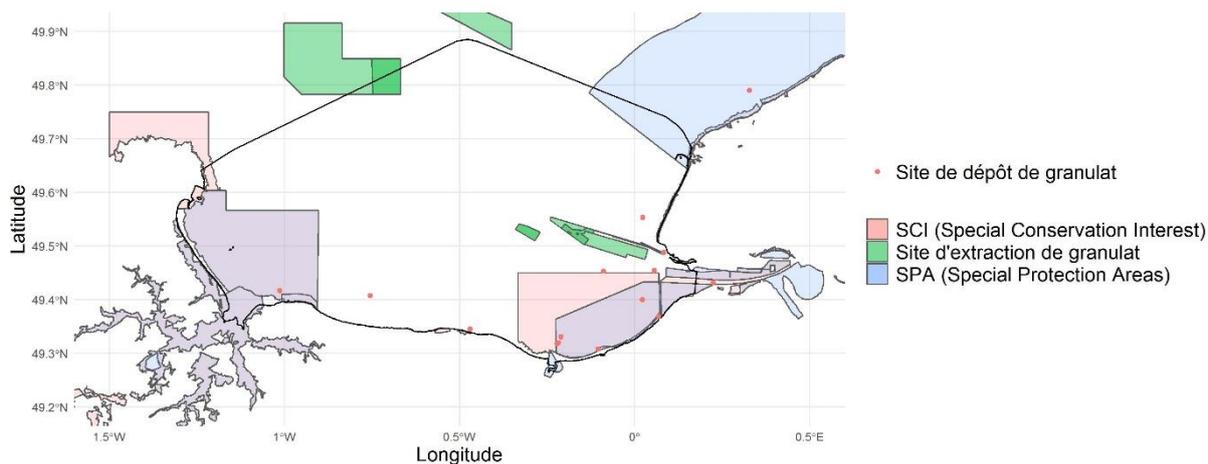


Figure 14. Cartographie des différentes législations en baie de Seine.

### III.b. Densité d'occupation de l'espace marin

#### i. Séries moyennées

La Figure 15 ci-dessous représente la cartographie moyenne des densités mensuelles de navires pour les cinq activités explicitées en section Matériels et méthodes I.b. De façon très nette, la pêche est l'activité participant le plus à l'occupation de l'espace marin par les bateaux, et ce de façon homogène sur quasiment l'ensemble de la baie. Les navires de plaisance sont particulièrement concentrés sur les littoraux, bien qu'il soit possible de discerner les routes empruntées en pleine mer. C'est également le cas pour le transport, pour lequel les routes maritimes orientées vers ou depuis le nord et l'ouest sont particulièrement discernables. La densité de navires de transport se concentre de façon notable en sortie d'estuaire de Seine, où les densités dépassent largement les  $30h \cdot km^2$ . Autrement, on peut constater un certain nombre de zones très localisées à l'ouest. En ce qui concerne les activités de dragage et de service, la densité est plus importante sur la partie est de la baie, et notamment en sortie d'estuaire de Seine.

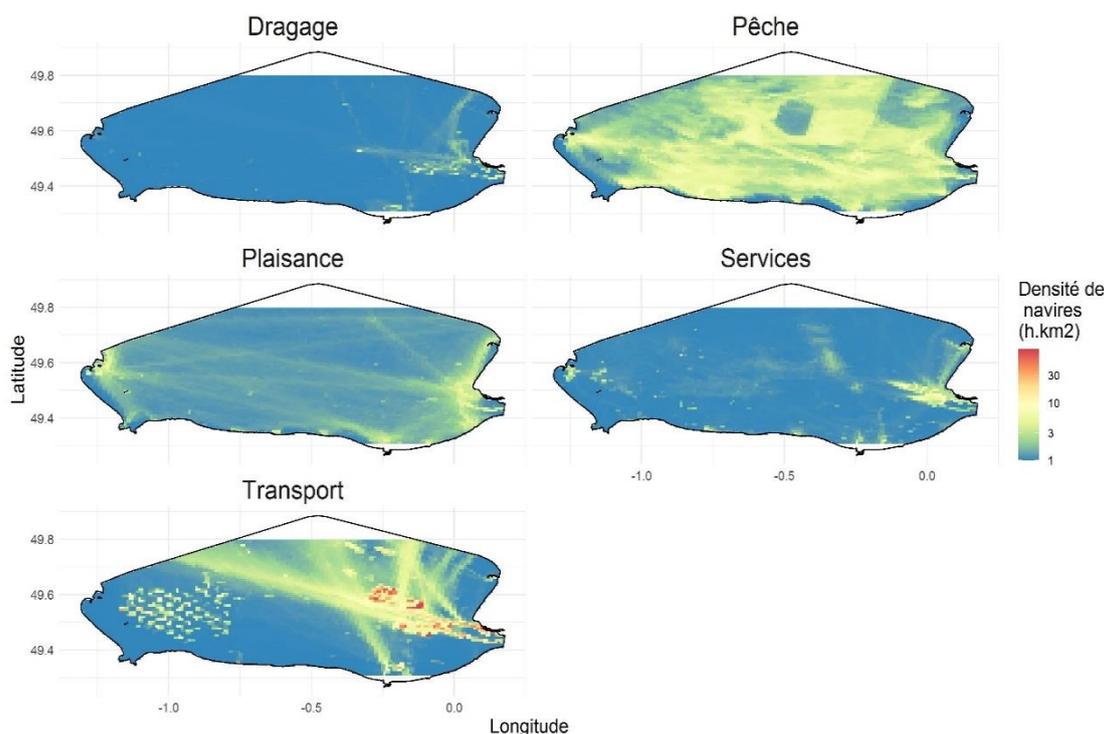


Figure 15. Cartographie des densités de navires par activité anthropique telles que présentées en section Matériels et méthodes I.c, en heure \* kilomètre carré.

## ii. Régionalisation finale

Six zones homogènes en termes d'activités anthropiques résultent de la classification (Figure 16). Les boîtes à moustaches associées à chaque zone par activité, présentées en Figure 17, permettent de cerner les caractéristiques de chaque zone.

La deuxième zone, très étalée sur l'ensemble de la baie, a pour activité majoritaire la pêche. La première zone, dont la superficie est également très étalée sur la baie, est caractérisée par une faible concentration d'activité, quelle qu'elle soit. La pêche y est l'activité majoritaire, mais concentre la densité de navire la plus faible de toutes les zones. La zone 3 est particulière en ce qu'elle est très côtière mais exclut quasi complètement le littoral sud de la baie, en comprenant tout de même l'estuaire de l'Orne. La pêche, la plaisance et en moindre mesure les services sont les activités qui y concentrent la majorité des navires. La quatrième zone est la plus restreinte en termes de superficie, et se différencie des autres par sa concentration particulièrement élevée de navires destinés au dragage. Cela s'explique par sa localisation en sortie d'estuaire de Seine, où la navigation est importante et requiert particulièrement ce type d'intervention. Le nombre de pixels définissant cette zone étant très faible, elle est difficilement perceptible sur la carte. Ce cas de figure permet de prendre conscience de l'intérêt du couplage entre la carte de régionalisation et l'analyse de boîtes à moustaches pour chaque zone, puisque la spécificité de la zone 4, ayant

poussé NbClust à l'individualiser est ainsi plus visible sur une représentation en boîte à moustaches. La cinquième zone est très peu étendue et située en sortie d'estuaire de Seine. L'activité qui y concentre le plus de navires est la prestation de services, mais la plaisance et la pêche sont également en proportions importantes, comparativement aux autres zones. La sixième zone est celle pour laquelle la densité de navires de transport est la plus élevée et correspond à l'endroit où semblent se croiser la plupart des routes maritimes en baie de Seine (Figure 15). Il s'agit de l'activité principale de cette zone.

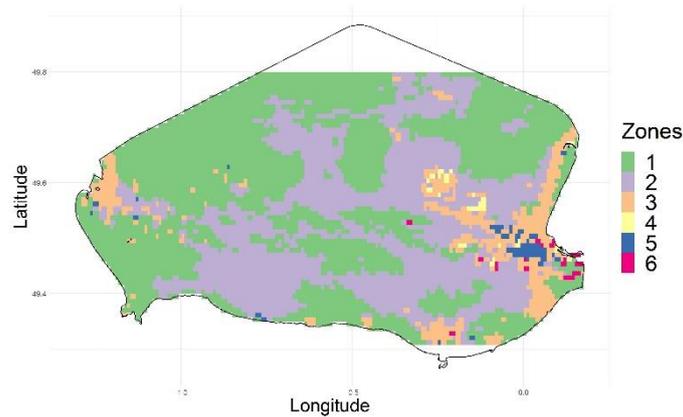


Figure 16. Cartographie de la baie de Seine zonée en fonction des résultats de la classification sur l'ensemble des activités anthropiques.

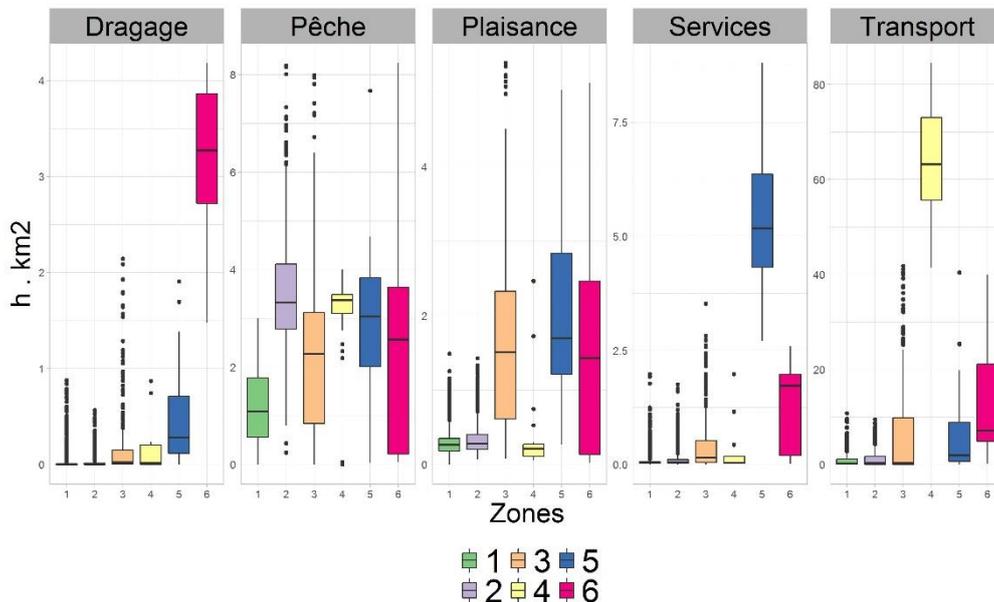


Figure 17. Boîtes à moustache des densités de navires, par type d'activité.

## Discussion

### I. Atouts de la méthodologie

Durant cette étude, un certain nombre de traitements ont été menés sur un panel de données large, et ce afin d'appréhender le fonctionnement de l'écosystème en baie de Seine. Un des objectifs était de mener une méthode la plus reproductible possible, afin qu'elle puisse être appliquée sur n'importe quelle région marine. Pour se faire, l'accent a été mis sur l'utilisation de jeux de données accessibles en ligne. Toutes ces données sont en ligne, gratuites, documentées et mises à jour par les différentes bases de données (Reichman et al. 2011). En parallèle, l'intégralité des scripts, autrement dit les traitements codés avec le langage R sont mis à disposition sur la plateforme GitHub. Cette infrastructure permet d'assurer le partage, la sauvegarde et la transparence des méthodes développées dans ce rapport.

Cette volonté va dans le sens de la recherche actuelle. En effet, la multiplication des jeux de données, conjuguée à une demande de transparence de la part de la communauté scientifique résulte en une gestion des données plus régulée et homogène, suivant les principes FAIR (Findability, Accessibility Interoperability, Reusability). Ces derniers ont été réfléchis et publiés par un groupe de travail en 2016, dont l'objectif est de guider les acteurs du monde scientifique pour un partage et une publication des données respectant les quatre principes précités (Wilkinson et al. 2016).

Autrement, la méthode tend à être la plus objective possible, afin de servir ce souhait de reproductibilité. L'élection du nombre de cluster optimal dans le processus de CAH est ainsi indépendante, automatisée grâce au package NbClust, qui effectue cette sélection en fonction de la méthode d'agrégation et donc de la qualité de partitionnement désirée (section Matériels et méthodes III.a). De même, le choix de la méthode d'agrégation pour les CAH a été mené suivant l'étude de différents indices de partitionnement, et non par habitude d'utilisation d'une méthode particulière.

Enfin, le travail effectué sur les données a pour objectif de créer un panel de résultats très diversifié, tout en les rendant abordables pour tout destinataire, par le biais de leurs représentations cartographiques. Cela a pour intérêt d'ouvrir une discussion entre différents acteurs aux expertises variées (gestionnaires, pêcheurs, industriels...) et adaptables suivant l'utilisation qu'on souhaite en faire par la suite.

Ainsi, le travail a été mené durant cet étude en essayant d'intégrer les différents challenges que soulève l'écologie quantitative, dont celui précédemment cité d'hétérogénéité des données et de

certaines autres notamment explicités par les travaux de Reichman, Jones et Schildhauer dans « Challenges and Opportunities of Open Data in Ecology » (2011).

## II. L'étude de la faune via les traits fonctionnels

Etudier des groupes d'espèces aux traits fonctionnels équivalents peut être riche d'enseignement sur la structuration des communautés dans le milieu, ainsi que sur la façon la plus optimale de gérer leur préservation dans l'environnement.

En effet, comme énoncé dans la section Résultats II.a, la classification a notamment permis de regrouper ensemble des espèces qu'il serait nécessaire de surveiller, en raison de leur statut IUCN préoccupant (communauté II). L'analyse des autres traits qui les caractérisent peut constituer un moyen d'expliquer cela. Ces espèces mûrent tard et ont une taille élevée, deux caractéristiques qui influencent la probabilité de les capturer avant leur arrivée à maturité sexuelle. Une telle capture peut être responsable d'une diminution progressive de la population par impossibilité pour ces individus de se reproduire avant la capture (Ifremer 2013). Ainsi, une réflexion particulière sur le maillage des filets à utiliser dans les zones d'affluence de ces espèces peut être à privilégier. De même, le partitionnement a permis la formation de la communauté I, qui comprend 4 des 7 espèces les plus commercialisées en Normandie (le hareng (*Clupea harengus*), le maquereau (*Scomber scombrus*), le merlan bleu (*Micromesistius poutassou*), et le merlan (*Merlangius merlangus*)) (Ifremer and Système d'Informations Halieutiques 2019). La régionalisation de cette communauté (qui prend en compte leur évolution dans le temps) peut être particulièrement utile pour les organisations de gestion des pêches.

La classification des espèces par leurs traits fonctionnels renseigne aussi sur les stratégies d'histoire de vie qu'elles adoptent. En effet, en utilisant des traits tels que la croissance, la taille ou encore la longévité, il est possible d'identifier les stratégies évolutives potentiellement suivies par ces espèces. Cette information renseigne alors d'avantage sur les préférences environnementales des espèces, ou encore sur la dynamique de leurs communautés : les espèces ayant une stratégie dite opportuniste, sont davantage retrouvées dans des habitats sujets à une variation environnementale importante (Winemiller 2005). Celles adoptant une stratégie dite équilibrée, sont caractérisées par une longue durée de vie, une tardive maturation et une faible fécondité. Ces caractéristiques sont la raison pour laquelle, face à une réduction trop importante de la population (par la pêche par exemple), ces espèces peuvent s'éteindre ou ne pourront se reconstituer que sur de temps longs.

### III. Interprétation et croisement des différentes régionalisations

Dans une optique de simplification de l'information, il a été choisi de ne pas superposer les différentes cartographies obtenues, mais plutôt de les comparer entre elles. La mise en parallèle de ces cartes est présentée en Figure 18.

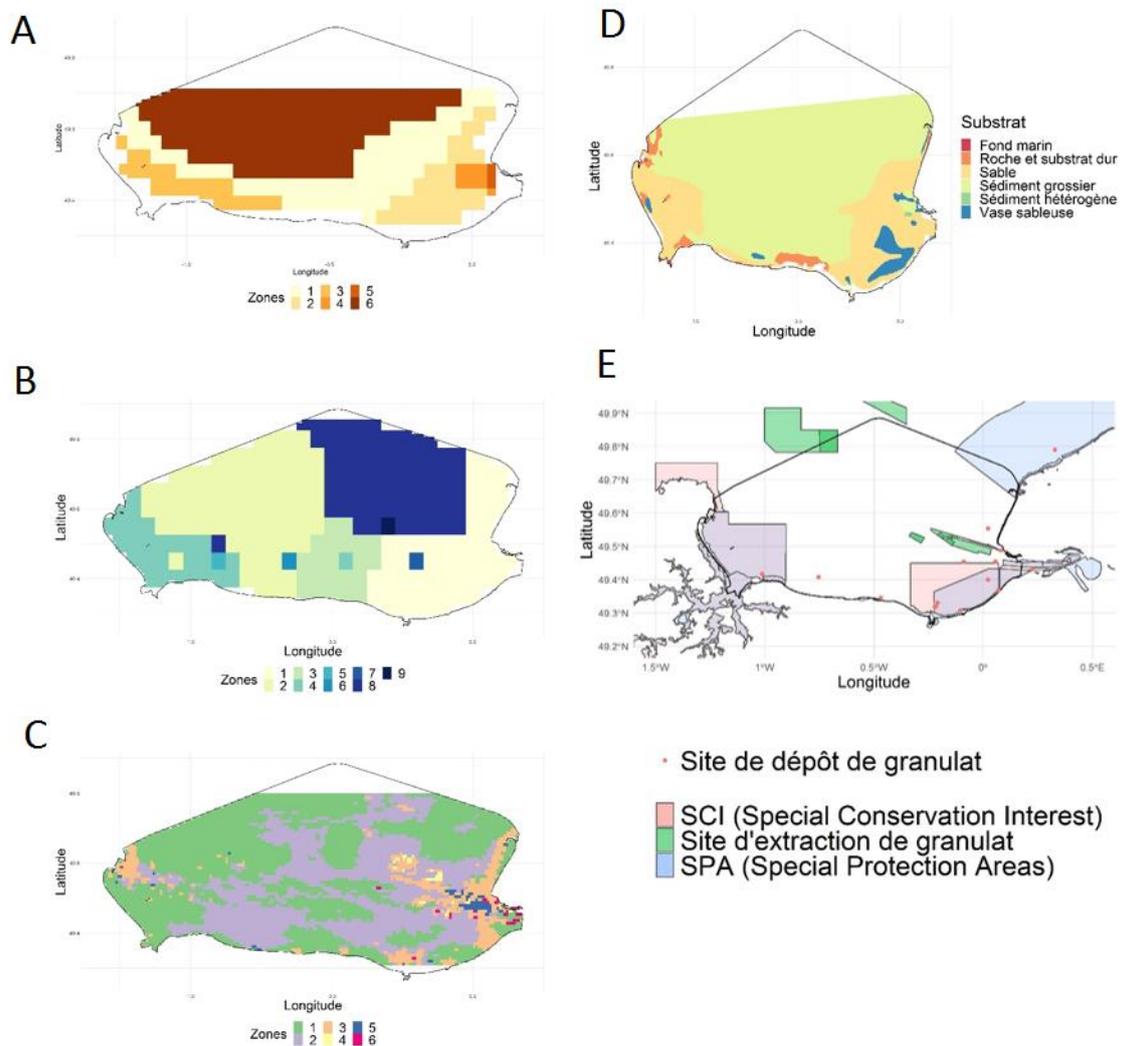


Figure 18. Mise en parallèle des cartographies résumant l'information des différents facteurs étudiés. A : Régionalisation des conditions environnementales, B : Régionalisation des conditions biologiques, C : Régionalisation de l'occupation maritime, D : Cartographie des substrats marins, E : Cartographie des législations en baie de Seine.

En section Résultats I.b, il a été constaté que les valeurs des différents paramètres environnementaux étudiés sont plus élevées sur les côtes qu'en pleine mer, et ce pour l'ensemble des paramètres environnementaux, excepté la salinité, largement diminuée sur les littoraux par apport fluvial d'eau douce. Cette intensification des valeurs en zone côtière témoigne de son importante activité biologique, elle-même influencé par des facteurs environnementaux. En effet, combinés ensemble, plusieurs de ces facteurs contribuent à l'eutrophie des zones côtières. La

faible profondeur aux côtes permet ainsi une meilleure pénétration de la lumière, favorisant l'activité photosynthétique (Nicolas et al. 2010). Les apports fluviaux quant à eux contribuent à l'enrichissement des estuaires en nutriments, eux aussi indispensables à la production de biomasse par les organismes, sans compter les apports terrigènes qui participent à la concentration en détritiques et à la turbidité marquées (Napoléon et al. 2012). De plus, les boîtes à moustaches des paramètres environnementaux dans chaque zone de la baie présentées en Figure 6 permettent de constater que les valeurs sont globalement plus variables sur les littoraux qu'en pleine mer, où les valeurs sont bien moins étalées autour de la médiane (notamment pour la chlorophylle a, les particules et la turbidité). Ce résultat démontre l'influence de l'interface terre-mer sur les facteurs environnementaux (Nicolas et al. 2010).

Ce constat, néanmoins plus évident avec l'analyse des paramètres environnementaux peut être généralisé à l'ensemble des facteurs étudiés : de manière globale, les zones côtières plus hétérogènes en terme de zonation se distinguent d'une zone plus large et homogène située au centre de la baie. Cela s'explique dans un premier temps par l'importante influence continentale subies par les littoraux, comme détaillé dans le paragraphe précédent. Dans un second temps, les littoraux concentrent un nombre plus important d'activités anthropiques, en comparaison avec le large où la pêche et le transport prédominent. Etant donnée les nombreux fleuves se déversant en baie de Seine et la pluralité d'activités littorales qui s'y concentrent (Figure 2), il serait intéressant d'apporter à ces régionalisations les informations relatives aux polluants physico-chimiques également transportés par les fleuves, ainsi que les dynamiques de circulation des masses d'eau en baie de Seine. Ceux-ci pourraient être la cause de pollutions très localisées amenant à des variations de la structuration des communautés, ou encore expliquer par endroits la concentration de particules en suspension.

Cela étant, la régionalisation par les communautés biologiques distingue, elle, deux grandes zones au centre de la baie. La structuration des communautés est donc influencée par des facteurs qui ne sont pas visualisables ici. Cette relative absence de concordance entre les régionalisations environnementale et biologique peut être en partie expliquée par les travaux de Stevens et Connolly en 2004, dans lesquels est étudiée la fiabilité des variables abiotiques pour la prédiction de distribution biologique. La capacité de prédiction de cette distribution par les variables abiotiques ne dépasserait ainsi pas 6% (Stevens and Connolly 2004).

L'estuaire de Seine ainsi que la baie des Veys se distinguent également, et ce sur toutes les cartographies. La multiplication des activités en estuaire de Seine (Figure 18.C) contribue à son occupation très dense en terme de navires. D'un point de vue environnemental, Le débit de la Seine particulièrement important (en comparaison des autres fleuves de la baie) en fait une zone très riche biologiquement (Muséum national d'Histoire naturelle 2020). Enfin, sa concentration

en sédiments très fins (sableux et vaseux d'après la Figure 18.D), en fait un habitat d'intérêt communautaire, qui explique son statut de site Natura 2000 (Figure 18.E) (Muséum national d'Histoire naturelle 2020)

En ce qui concerne la baie des Veys, sa spécificité biologique et environnementale en fait une zone unique en baie de Seine, d'après les Figure 18.A et 18.B. Cette particularité pourrait expliquer les protections réglementaires (statut SCI et SPA d'après la Figure 18.E) dont elle bénéficie. De plus, la Figure 18.C place la baie des Veys dans une zone caractérisée par une faible occupation de l'espace, que ce soit par pêche que d'autres activités.

Il semblerait que certains endroits soient évités des navires de pêche, et ce pour d'autres raisons que la mise en place de législation de protection. En effet, une partie du littoral Sud, situé au niveau des ports de Courseulles et Port-en-Bessin correspond à une zone de faible activité humaine (Figure 18.C). Cette absence peut s'expliquer par le sédiment rocheux de cette zone (Figure 18.D), qui limite la pratique de ces activités. Autrement, cet évitement peut également être expliqué par la présence en baie de Seine de quatre zones particulièrement riches en ophiures (*Ophiothrix*), comme visible en Annexe 21. Leur concentration très localisée (jusqu'à 7 450 individus par mètre carré) est ainsi une contrainte pour les pêcheurs qui ne ciblent pas cette espèce (Ramsay et al. 1998, Baffreau 2019).

#### IV. Etude de cas

Afin d'illustrer le potentiel d'une telle démarche dans un processus de planification d'activité anthropique, le cas du projet d'implantation du parc éolien de Courseulles-sur-mer a été étudié. Il s'agit de l'implantation de 64 éoliennes à près de 10 kilomètres du littoral, au Nord de Courseulles, dont la mise en service est planifiée pour l'année 2024 (DREAL Normandie and Ministère de la transition écologique et solidaire 2019) La Figure 19 ci-après permet de visualiser les différentes conditions (environnementales, biologiques et anthropiques) du site prévu pour l'emplacement de ce parc.

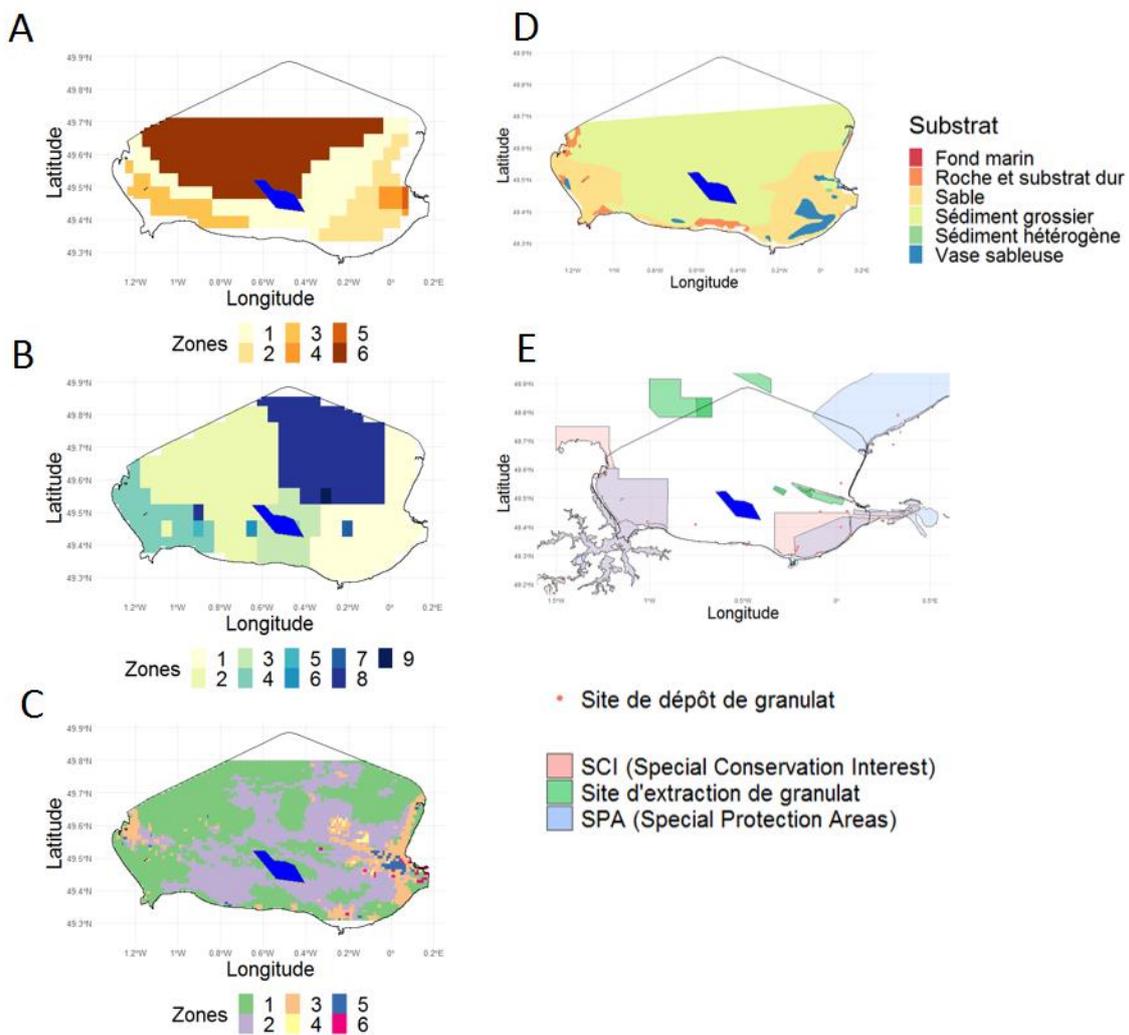


Figure 19. Intégration du parc éolien de Courseulles-sur-mer (en bleu) dans les différentes régionalisations obtenues.

Une première analyse de la Figure 19 permet de relever la cohérence du site choisi pour l'implantation du parc. En effet, le parc est prévu dans une large zone de sédiments grossiers (Figure 19.D) adaptée à l'implantation des monopieux des éoliennes (DREAL Normandie and Ministère de la transition écologique et solidaire 2019). La structuration des communautés à cet endroit est homogène avec l'ensemble de la baie (zones 1 et 3 sur la Figure 19.B) et ne correspond pas à un site de biologie très localisé (pixels éparses correspondants aux zones 9, 7, 6 et 4 de la Figure 19.B). Le projet ne rentre pas dans une zone à législation particulière (Figure 19.E), et se situe dans une zone de moindre activité de pêche et quasi absence des autres activités (Figure 17 19.C). Afin d'analyser les impacts de ce projet, il serait nécessaire d'étudier les potentiels influences des éoliennes sur l'hydrodynamisme, la sédimentation ou encore la biodiversité et les conditions environnementales du milieu. Cette succincte analyse permet ainsi de démontrer que la régionalisation permet d'arriver rapidement à un premier bilan sur la faisabilité d'un projet dans une zone marine donnée, ainsi que de percevoir sur quel facteur doit se porter l'attention au cours d'une réflexion sur la gestion du projet.

## V. Les limites

La démarche ainsi menée a été confrontée à un certain nombre de contraintes qui méritent d'être soulignées. Premièrement, comme toute campagne scientifique en mer la CGFS ne permet pas d'obtenir un panel d'informations biologiques sur l'ensemble de la baie, en suivant un échantillonnage strict. Plusieurs raisons peuvent expliquer un échantillonnage irrégulier comme montré en Figure 1 Figure 3. Un fond marin présentant des sédiments grossiers voire rocheux complique la manipulation du chalut de fond. Pour cette raison il peut être choisis de contourner ces endroits et ainsi omettre leur échantillonnage. Autrement les conditions climatiques en mer peuvent être contraignantes et pousser les agents à rentrer au port avant d'avoir pu chaluter l'ensemble de la zone. Des données biologiques mieux réparties sur l'ensemble de la baie aurait permis une interpolation plus fidèle à la réalité, donc des résultats plus robustes.

Autrement, l'Annexe 13 permet de constater que les données concernant les espèces benthiques durant les campagne CGFS ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2014 (toutes les années précédentes ont été interpolées de façon identiques en raison d'une absence totale de données). Ainsi, pour un certain nombre d'espèces les informations sont disponibles sur 6 années seulement, ce qui contraint une nouvelle fois l'interpolation des densités de capture, et à termes la régionalisation. Or les travaux de (Brind'Amour et al. 2014) démontrent que les espèces benthiques ont bien été identifiées lors de campagnes CGFS avant 2014. Cela indique une non transparence dans le traitement et la disponibilité des données de cette campagne, en ce qui concerne le benthos du moins.

La recherche de traits fonctionnels pour les taxons identifiés durant la CGFS a été compliquée par l'absence de vérification taxonomique sur les listes de taxons concernées, aussi bien de BIOTIC, des travaux de Beukhof et al. 2019, que de Fishbase, une autre base de données considérée lors de cette étude qui a finalement été laissée de côté en faveur des informations issus de « A trait collection of marine fish species from North Atlantic and Northeast Pacific continental shelf seas » (Beukhof et al. 2019). Cela contraint la concordance entre la liste de taxons dans les bases et celle étudiée, laissant penser en premier abord que des traits fonctionnels sont connus pour une part très réduite de taxons.

Enfin, il aurait été intéressant de travailler avec les données de débarquement issues de la pêche professionnelle, afin d'avoir une idée des densités de capture des espèces destinées à la vente. Cependant, ces données ne sont aujourd'hui pas disponibles au public, pour cette raison elles n'ont pas été traitées dans cette étude.

## Conclusion

La démarche présentée dans ce rapport a ainsi permis de résumer un certain nombre de processus écologiques sur un bassin délimité, la baie de Seine. En utilisant des données aussi variées que des données satellitaires, mais aussi des données issues de campagnes scientifiques en mer et des traits fonctionnels disponibles en ligne, des procédés statistiques et de géotraitement ont été menés afin d'aboutir à plusieurs cartes, chacune résumant le facteur considéré : compartiment environnemental, faune, usages et législation en vigueur en baie de Seine. Malgré les difficultés liées à l'accessibilité ou encore la complexité des données, une première analyse du fonctionnement de la baie de Seine a pu être réalisée, démontrant ainsi l'intérêt d'une étude de bassin marin par approche écosystémique. Les résultats obtenus ont été utilisés dans un cas pratique, afin de tester son potentiel en tant qu'outil de gestion de projets. Le site prévu pour le futur parc éolien de Courseulles-sur-mer a ainsi été confronté aux cartes obtenues, afin de dégager les principales caractéristiques d'implantation de ce parc en baie de Seine. Les résultats de la démarche élaborée ont également pour objectif le processus inverse, autrement dit de fournir un état de l'art des conditions d'un milieu utilisable lors d'une planification des activités anthropiques. L'accent a été porté durant cette étude sur la reproductibilité, l'objectivité et la transparence de la démarche, afin de la rendre accessible à tous et ainsi faire avancer la recherche sur la MSP et ses outils d'application.

## Bibliographie

- Andonegi E, Borges M, Collie J, Depestele J, Feekings J, Greenstreet S, Jónsdóttir I, Kenchington E, Magath V, Moriarty M, Piet G, Ragnarsson S, Rau A, Reid D, Rindorf A, Rochet M-J, Wennhage H. 2016. Report of the Working Group on the Ecosystem Effects of Fishing Activities (WGECO). .
- Ayata S-D, Irsson J-O, Aubert A, Berline L, Dutay J-C, Mayot N, Nieblas A-E, d'Ortenzio F, Palmiéri J, Reygondeau G. 2018. Regionalisation of the Mediterranean basin, a MERMEX synthesis. *Progress in Oceanography* 163: 7–20.
- Baffreau A. 2019. [Internet]. Available from: <https://inpn.mnhn.fr/zone/znieffMer/25M000007>
- Beukhof E, Dencker TS, Palomares MLD, Maureaud A. 2019. A trait collection of marine fish species from North Atlantic and Northeast Pacific continental shelf seas. .
- Boyd CE. 2000. *Water Quality - An introduction*. Boston, MA: Springer US.
- Brind'Amour A, Laffargue P, Morin J, Vaz S, Foveau A, Le Bris H. 2014. Morphospecies and taxonomic sufficiency of benthic megafauna in scientific bottom trawl surveys. *Continental Shelf Research* 72: 1–9.
- Campbell MS, Stehfest KM, Votier SC, Hall-Spencer JM. 2014. Mapping fisheries for marine spatial planning: Gear-specific vessel monitoring system (VMS), marine conservation and offshore renewable energy. *Marine Policy* 45: 293–300.
- Charrad M, Ghazzali N, Boiteau V, Niknafs A. 2014. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software* 61: 1–36.
- Commission administrative de la Façade Maritime Manche Est-Mer du Nord. 2015. Etude des usages en baie de Seine orientale. .
- Commission Européenne. 2016. [Internet]. Available from: [https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/maritime\\_spatial\\_planning\\_fr](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/maritime_spatial_planning_fr)
- Conseil International pour l'Exploration de la Mer. [Internet]. Available from: <https://www.ices.dk/data/data-portals/Pages/DATRAS.aspx>
- Coomber F, D'Incà M, Rosso M, Tepsich P, Di Sciara G, Moulins A. 2016. Description of the vessel traffic within the north Pelagos Sanctuary: Inputs for Marine Spatial Planning and management implications within an existing international Marine Protected Area. *Marine Policy* 69: .
- Copernicus. [Internet]. Available from: <https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus>
- Coppin F, Giraldo C, Travers-Trolet M. 1988. CGFS : CHANNEL GROUND FISH SURVEY. .
- Coppin F, Roy DL, Schlaich Y. 2009. Système d'information halieutiques - Campagnes à la mer. 29.
- Crowder L, Norse E. 2008. Essential ecological insights for marine ecosystem-based management and marine spatial planning. *Marine Policy* 32: 772–778.
- Curriculum Research & Development Group (CRDG). 2020. [Internet]. Available from: <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/density-effects/density-temperature-and-salinity>
- DREAL Normandie, Ministère de la transition écologique et solidaire. 2019. [Internet]. Available from: <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/l-eolien-offshore-a371.html>
- Dupont C, Gourmelon F, Meur-Ferec C, Hershers F, Le Visage C. 2020. Exploring uses of maritime surveillance data for marine spatial planning: A review of scientific literature. *Marine Policy* 117: 103930.
- Ehler C, Douvère F. 2009. *Marine spatial planning : A Step-by-Step Approach toward Ecosystem-based Management*. Intergovernmental Oceanographic Commission and Man and the Biosphere Programme. IOC Manual and Guides no. 53, ICAM Dossier no. 6. Paris: UNESCO: .
- EMODnet. [Internet]. Available from: <https://www.emodnet.eu/>
- European Environment Agency (EEA). 2019a. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/5423>
- European Environment Agency (EEA). 2019b. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/599>
- European Environment Agency (EEA). 2019c. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/446>
- European Environment Agency (EEA). 2019d. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/5428>
- European Environment Agency (EEA). 2019e. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/5427>

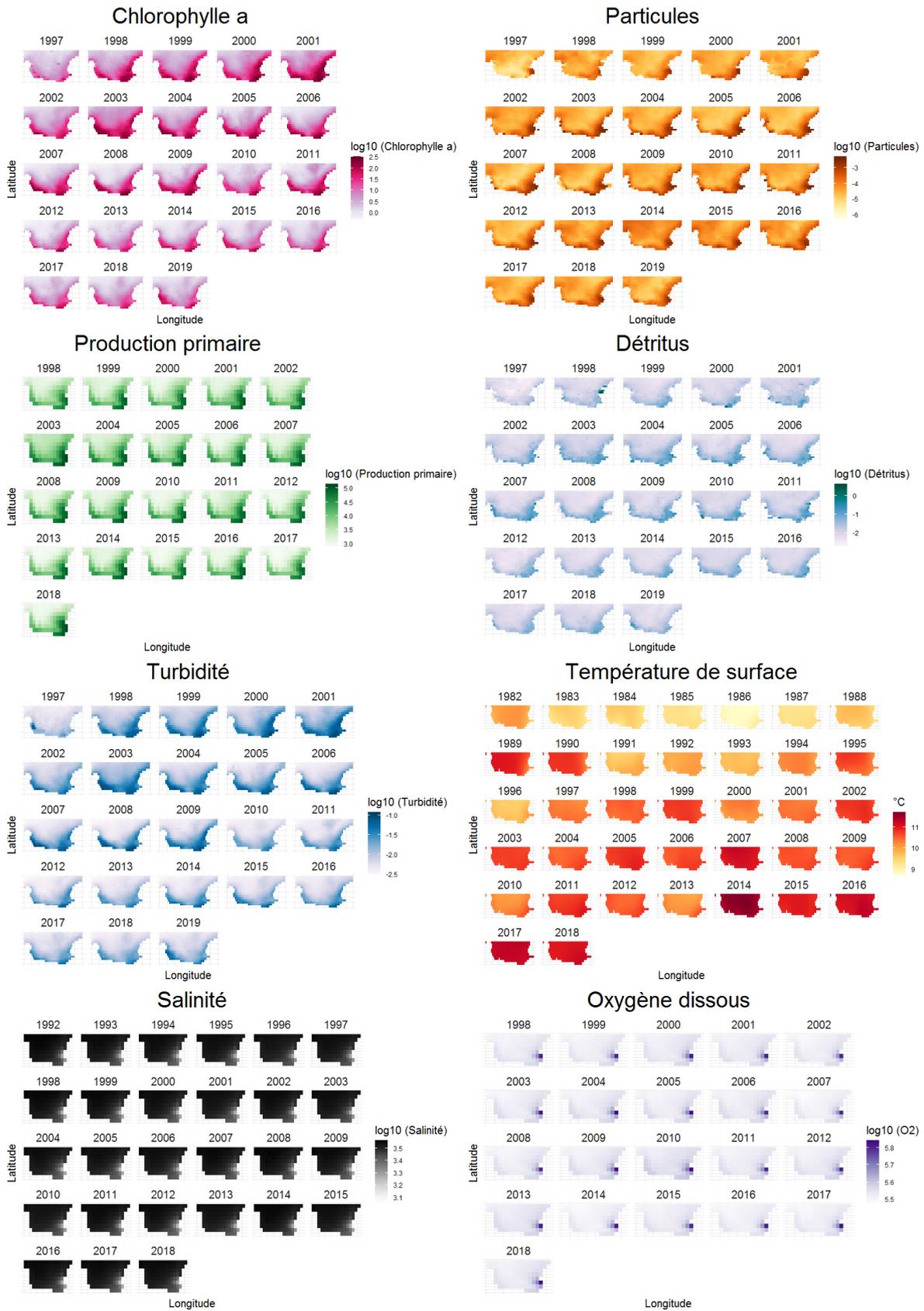
- European Environment Agency (EEA). 2019f. [Internet]. Available from: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/5429>
- European Environment Agency (EEA). 2020. [Internet]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification>
- Falco L, Pititto A, Adnams W, Earwaker N, Greidanus H. 2019. Vessel density map detailed method. 1.5. .
- Fernández-Delgado C, Baldó F, Vilas C, García-González D, Cuesta JA, González-Ortegón E, Drake P. 2007. Effects of the river discharge management on the nursery function of the Guadalquivir river estuary (SW Spain). *Hydrobiologia* 587: 125–136.
- Fiorini M, Capata A, Bloisi D. 2016. AIS Data Visualization for Maritime Spatial Planning (MSP). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, Elsevier 5: 45–60.
- Greenstreet SPR, Fraser HM, Rogers SI, Trenkel VM, Simpson SD, Pinnegar JK. 2012. Redundancy in metrics describing the composition, structure, and functioning of the North Sea demersal fish community. *ICES Journal of Marine Science* 69: 8–22.
- Greenwell B, Boehmke B. 2020. Hands-On Machine Learning with R.
- Groupeement d'Intérêt Public Seine-Aval. 2008. Niveaux d'oxygénation dans l'estuaire de la Seine.pdf.
- Halpern BS, Frazier M, Afflerbach J, Lowndes JS, Micheli F, O'Hara C, Scarborough C, Selkoe KA. 2019. Recent pace of change in human impact on the world's ocean. *Scientific Reports* 9: 11609.
- Hennig C. 2017. Cluster validation by measurement of clustering characteristics relevant to the user. .
- Hennig C. 2020. Flexible Procedures for Clustering.
- Hermanssen L, Mikkelsen L, Tougaard J, Beedholm K, Johnson M, Madsen PT. 2019. Recreational vessels without Automatic Identification System (AIS) dominate anthropogenic noise contributions to a shallow water soundscape. *Scientific Reports* 6: .
- Holstein J. 2018. worms: Retriving Aphia Information from World Register of Marine Species.
- van Hoof L. 2015. Fisheries management, the ecosystem approach, regionalisation and the elephants in the room. *Marine Policy* 60: 20–26.
- Husson F, Josse J, Pages J. Principal component methods - hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data? 17.
- Ifremer. 2013. La pêche en période de reproduction est-elle compatible avec une pêche durable ? .
- Ifremer, Système d'Informations Haliéutiques. 2019. Région Normandie. 2018. Activité des navires de pêche. .
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2020. [Internet]. Available from: <https://www.iucnredlist.org/en>
- Kakaï G, Salako V, Padonou E, Lykke AM, Lucas R. 2016. Méthodes statistiques multivariées utilisées en écologie. *Annales des Sciences Agronomiques* 20: 139–157.
- King JR, McFarlane GA. 2003. Marine fish life history strategies: applications to fishery management. *Fisheries Management and Ecology* 10: 249–264.
- Kroodsma D, Mayorga J, Hochberg T, Miller N, Boerder K, Ferretti F, Wilson A, Bergman B, White T, Block B, Woods P, Sullivan B, Costello C, Worm B. 2018. Tracking the Global Footprint of Fisheries. *Science* 359: .
- Le Guyader D, Ray C, Brosset D. 2017. Identifying small-scale fishing zones in France using AIS data. *Advances in Shipping Data Analysis and Modeling: Tracking and Mapping Maritime Flows in the Age of Big Data*
- Le S, Josse J, Husson F. 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis.
- Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M, Hornik K. 2019. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions.
- MarLIN. 2006. [Internet]. Available from: <http://www.marlin.ac.uk/biotic/>
- Marmin S, Dauvin J-C, Lesueur P. 2014. Collaborative approach for the management of harbour-dredged sediment in the Bay of Seine (France). *Ocean & Coastal Management* 102: 328–339.
- Mazzarella F, Fernandez Arguedas V, Vespe M. 2015. Knowledge based vessel position prediction using historical AIS data. .
- McLean M, Auber A, Graham NAJ, Houk P, Villéger S, Violle C, Thuiller W, Wilson SK, Mouillot D. 2019. Trait structure and redundancy determine sensitivity to disturbance in marine fish communities. *Global Change Biology* 25: 3424–3437.
- MINES ParisTech / ARMINES. 2020. RGeostats: The Geostatistical R Package. Fontainebleau, France:
- Morin J, Minier C, Bacq N, Dégremont C. 2010. Poissons, habitats, & ressources haliéutiques : 78.
- Müllner D. 2013. fastcluster: Fast Hierarchical, Agglomerative Clustering Routines for R and Python.
- Muséum national d'Histoire naturelle. 2020. Formulaire standard de données - Baie de Seine orientale. .
- Napoléon C, Raimbault V, Fiant L, Riou P, Lefebvre S, Lampert L, Claquin P. 2012. Spatiotemporal dynamics of physicochemical and photosynthetic parameters in the central English Channel. *Journal of Sea Research* 69: 43–52.

- Natale F, Gibin M, Alessandrini A, Vespe M, Paulrud A. 2015. Mapping Fishing Effort through AIS Data. *PLOS ONE* 10: e0130746.
- Nicolas D, Lobry J, Lepage M, Sautour B, Le Pape O, Cabral H, Uriarte A, Boët P. 2010. Fish under influence: a macroecological analysis of relations between fish species richness and environmental gradients among European tidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86: 137–147.
- Nzigou AR. 2012. Production primaire et fonctionnement écologique en milieu estuarien turbide : cas de l'estuaire de la Gironde (France). Bordeaux 1.
- Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne. 2014. Directive 2014/89/UE. .
- Petitgas, P.; Woillez, M.; Renard, D.; Bez, N.; And Rivoirard, J. 2017. Handbook of Geostatistics in R for Fisheries and Marine Ecology. .
- Pezy J-P, Baffreau A, Dauvin J-C. 2017. What are the factors driving long-term changes of the suprabenthos in the Seine estuary? *Marine Pollution Bulletin* 118: 307–318.
- R Core Team. 2020. R : A language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ramsay K, Kaiser MJ, Hughes RN. 1998. Responses of benthic scavengers to fishing disturbance by towed gears in different habitats. *Journal of experimental marine biology and ecology* 224: 73–89.
- Reichman OJ, Jones MB, Schildhauer MP. 2011. Challenges and opportunities of open data in ecology. *Science* 331: 703–705.
- Renshaw R, Wakelin S, Mahdon R, O'Dea E, Tinker J. 2019. Quality information document - North West European Shelf Production Centre. .
- RStudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development for R. Boston, MA:
- Stevens T, Connolly RM. 2004. Testing the utility of abiotic surrogates for marine habitat mapping at scales relevant to management. *Biological Conservation* 119: 351–362.
- Tetreault BJ. 2005. Use of the Automatic Identification System (AIS) for maritime domain awareness (MDA). *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*. p. 1590-1594 Vol. 2.
- Van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K. 2011. mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R.
- Vespe M, Gibin M, Alessandrini A, Natale F, Mazarella F, Osio GC. 2016. Mapping EU fishing activities using ship tracking data. *Journal of Maps* 12: .
- Volpe G, Colella S, Forneris V, Brando VE, Garnesson P, Taylor B, Grant M. 2020. Product user manual for all ocean colour products. 75.
- Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ, Appleton G, Axton M, Baak A, Blomberg N, Boiten J-W, da Silva Santos LB, Bourne PE. 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data* 3: 1–9.
- Winemiller KO. 2005. Life history strategies, population regulation, and implications for fisheries management. 62: 14.
- WoRMS Editorial Board. 2019. [Internet]. Available from: <http://www.marinespecies.org>

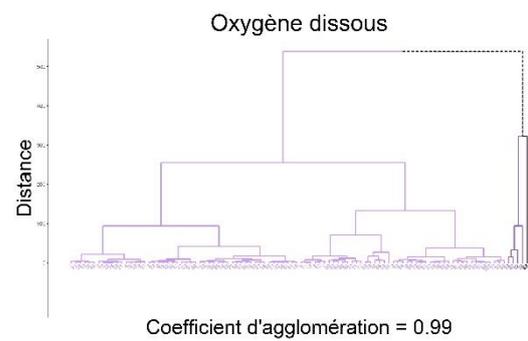
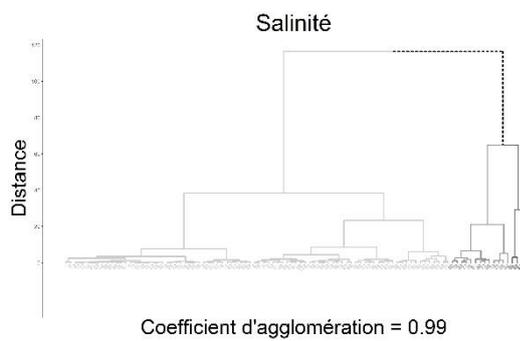
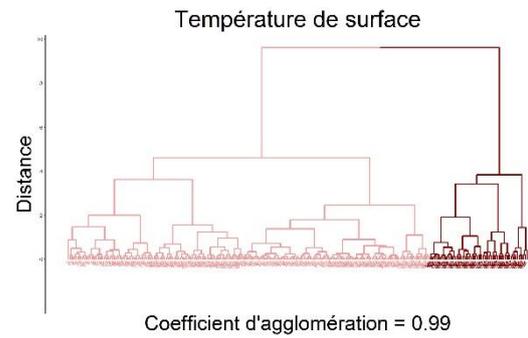
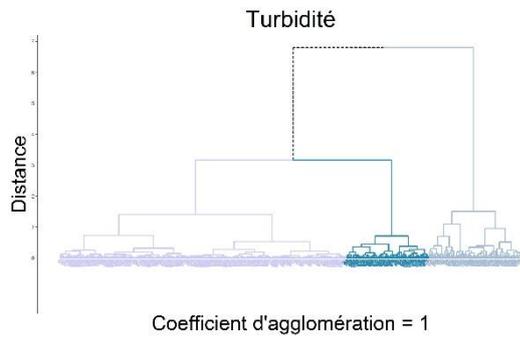
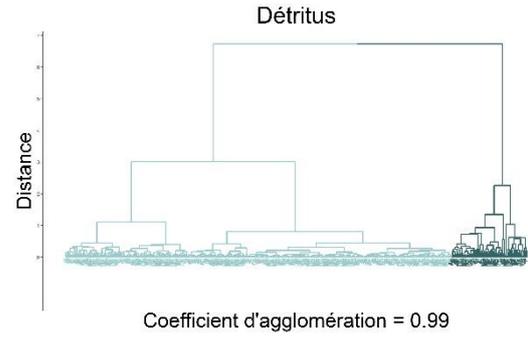
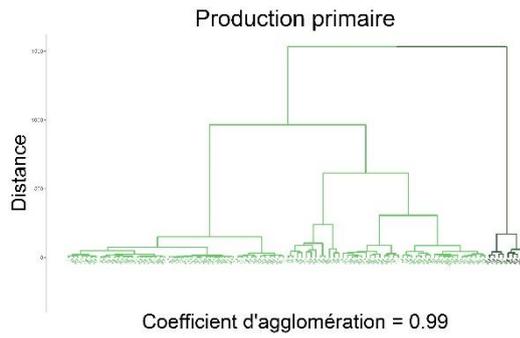
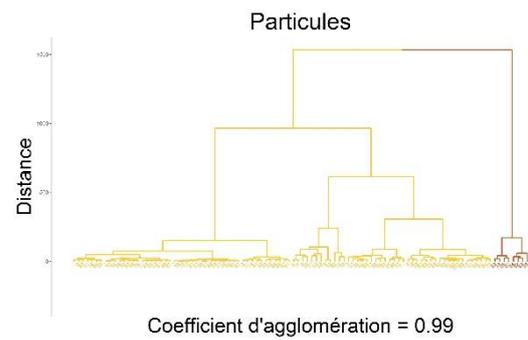
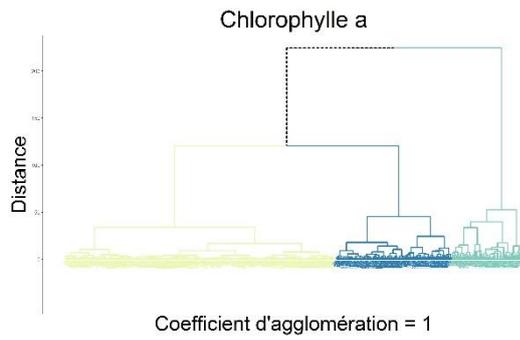
## Annexes

| Paramètre              | Période                        | Unité     | Nombre de zones | Nature      |
|------------------------|--------------------------------|-----------|-----------------|-------------|
| Chlorophylle a         | 1997-2019                      | mg/m3     | 3               | Observation |
| Production primaire    | 1998-2018                      | mg C/m3/j | 2               | Modèle      |
| Salinité               | 1992-2018                      | PSU       | 3               | Modèle      |
| Turbidité              | 1997-2019                      | m-1       | 3               | Observation |
| Température de surface | 1982-2018                      | °C        | 2               | Observation |
| Particules             | 1997-2019                      | m-1       | 2               | Observation |
| Détritus               | 1997-2019                      | m-1       | 2               | Observation |
| Oxygène dissous        | 1998-2018                      | mmol/m3   | 3               | Modèle      |
| Paramètre              | Moyenne (sur toute la période) | Minimum   | Maximum         | Variance    |
| Chlorophylle a         | 2.61                           | 0.1496    | 59.91           | 12.63       |
| Production primaire    | 48.37                          | 2.545     | 513             | 3059        |
| Salinité               | 33.29                          | 8.559     | 35.46           | 5.392       |
| Turbidité              | 0.1474                         | 0.03818   | 1.224           | 0.009665    |
| Température de surface | 10.34                          | 1.76      | 18.65           | 15.52       |
| Particules             | 0.015                          | 0.00104   | 0.1             | 0.00017     |
| Détritus               | 0.1628                         | 0.007406  | 1.898           | 0.01082     |
| Oxygène dissous        | 253.9                          | 0.31      | 627.28          | 798.5       |

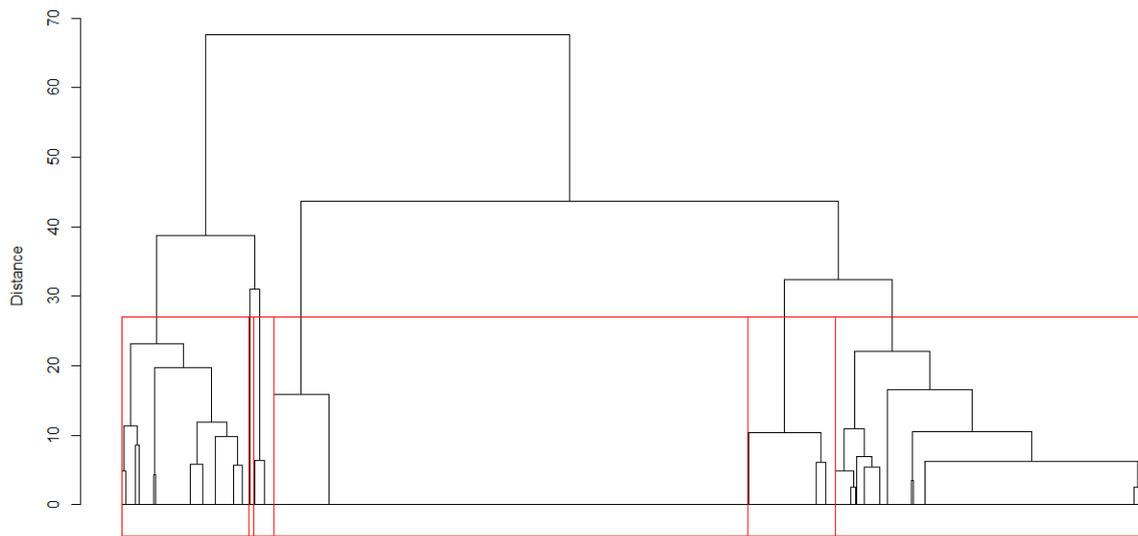
*Annexe 1. Tableau d'informations des données des huit paramètres environnementaux étudiés.*



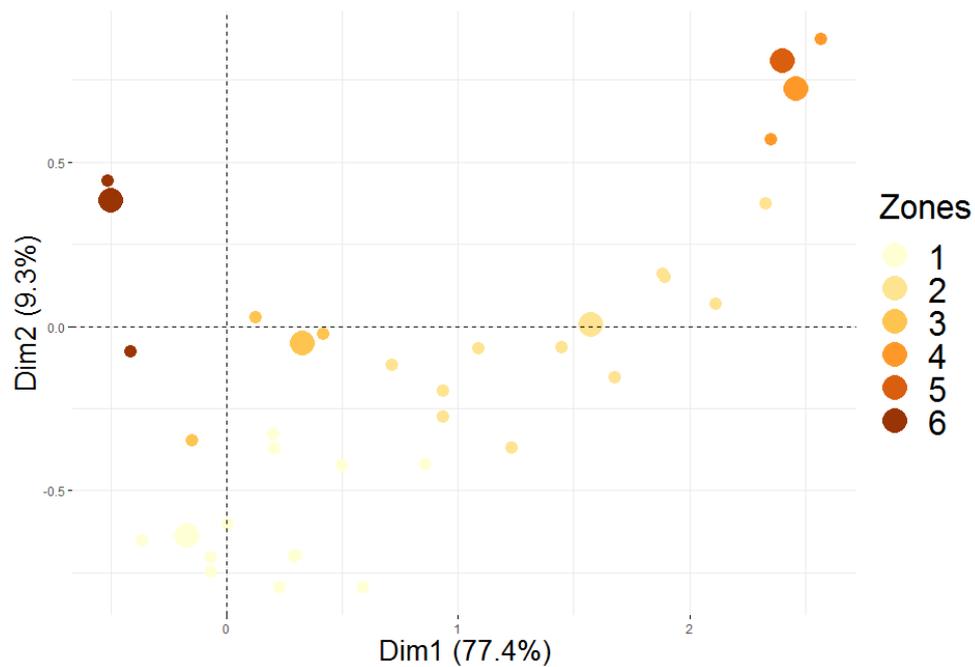
Annexe 2. Cartographie des huit paramètres environnementaux étudiés au cours du temps, selon la plage temporelle disponible.



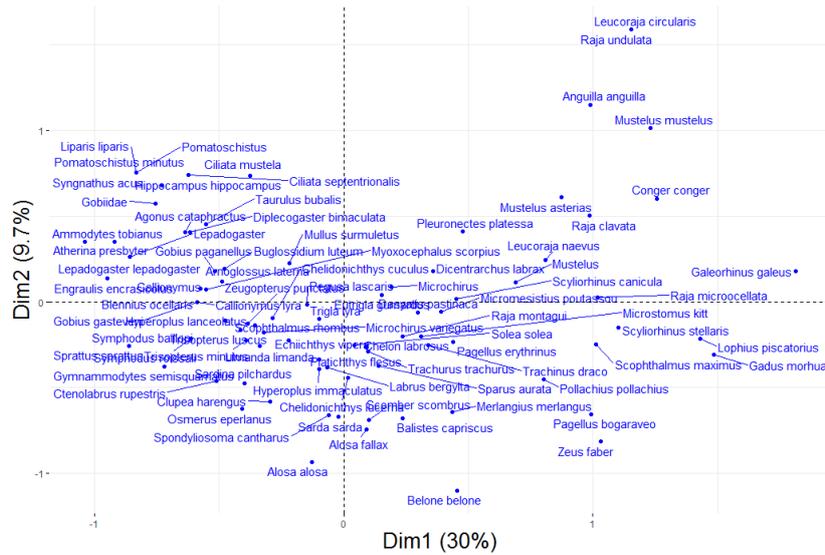
*Annexe 3. Dendrogrammes résultant de la CAH (par le critère de Ward) des huit paramètres environnementaux, coupés selon la recommandation définie par le package R NbClust (Figure 4).*



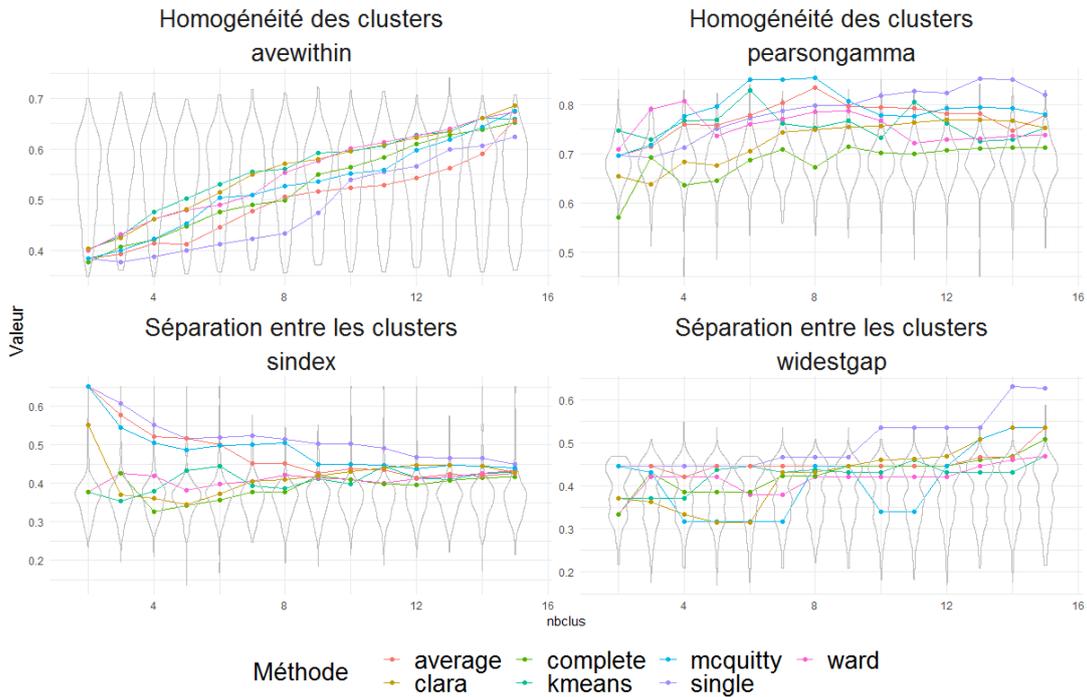
*Annexe 4. Dendrogramme résultant de la CAH (par le critère de Ward) des pixels de la baie en fonction de l'ensemble des paramètres environnementaux, coupé selon la recommandation définie par le package R NbClust.*



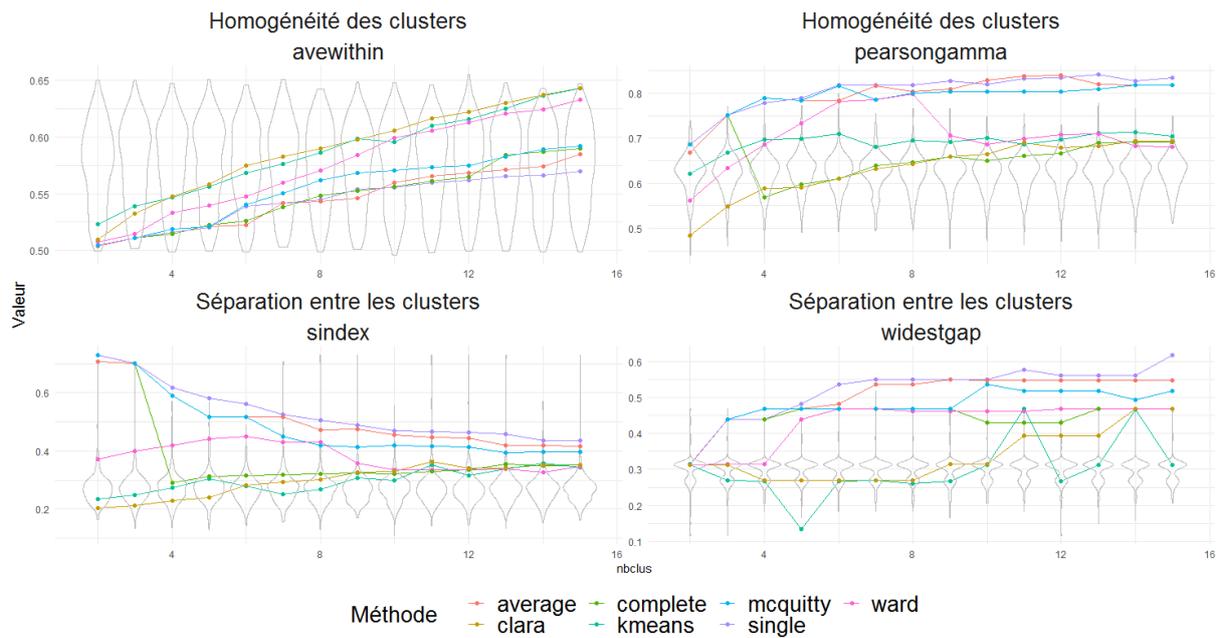
*Annexe 5. Nuage de points résultant de l'ACM réalisée sur tous les pixels de la baie en fonction des paramètres environnementaux, avec les zones qui leur sont associées après classification finale. Les points de taille supérieure représentent les centroïdes de chaque zone.*



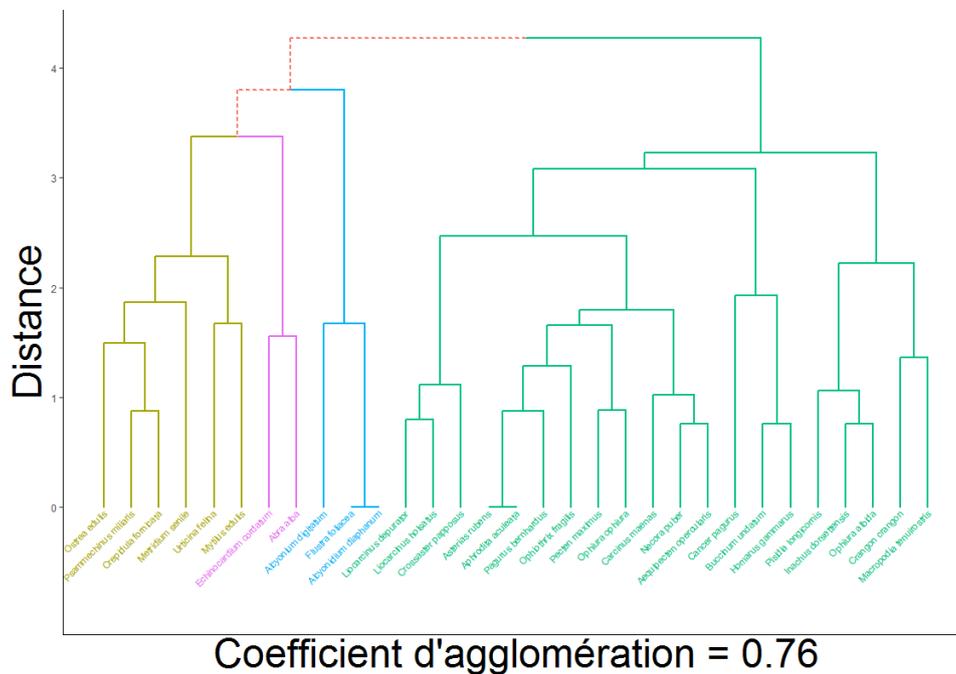
Annexe 6. Nuages de points issu de l'ACM, représentant les différentes espèces démersales dans un espace à deux dimensions.



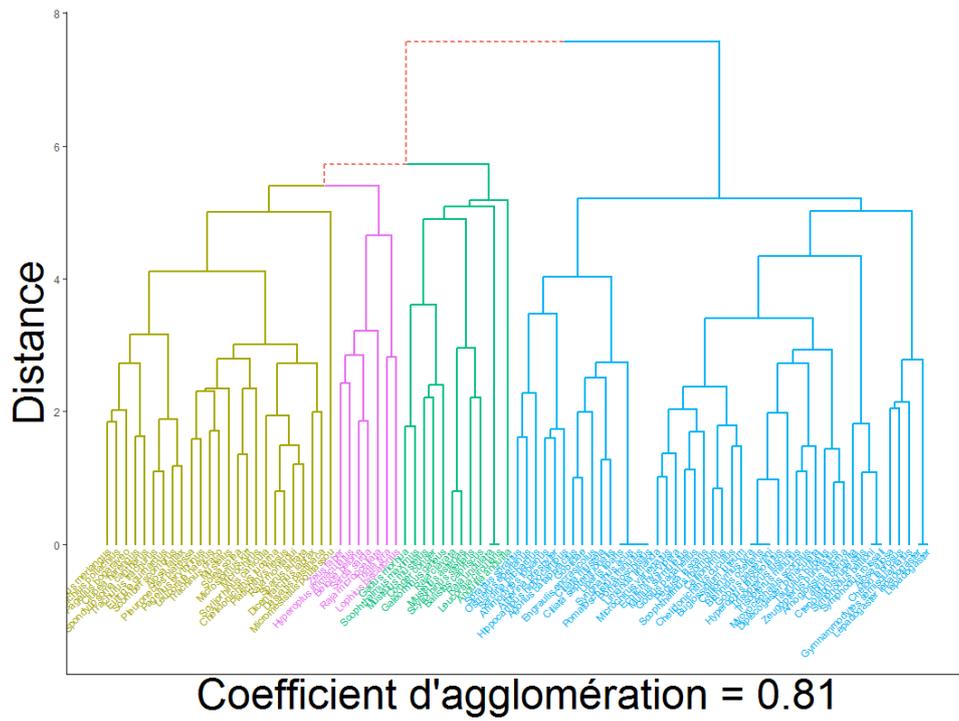
Annexe 7. Graphiques permettant la comparaison des différentes méthodes d'agrégation étudiées, ou méthode, suivant les quatre indices de partitionnement sélectionnés, et ce sur les données des taxons benthiques.



Annexe 8. Graphiques permettant la comparaison des différentes méthodes d'agrégation étudiées, ou méthode, suivant les quatre indices de partitionnement sélectionnés, et ce sur les données des taxons démersaux.



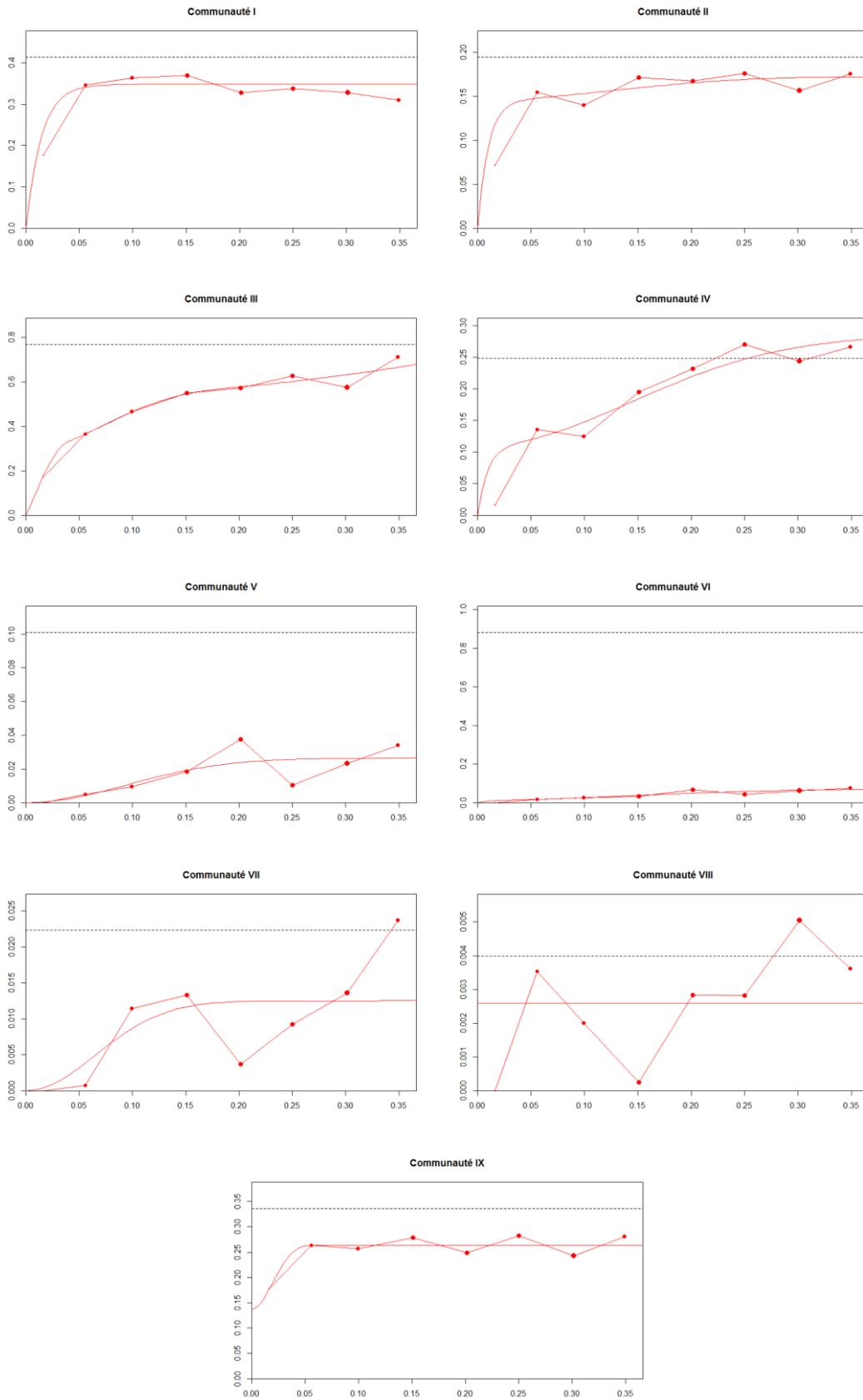
Annexe 9. Dendrogramme résultant de la CAH (par le critère de Ward) des taxons benthiques, coupé selon la recommandation définie par le package R NbClust.



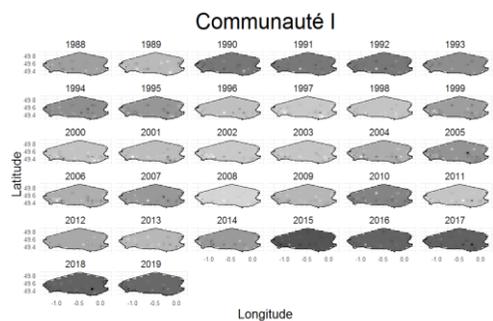
*Annexe 10. Dendrogramme résultant de la CAH (par le critère de Ward) des taxons démersaux, coupé selon la recommandation définie par le package R NbClust.*

| <b>Communauté I</b>            |                                  |                                |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| <i>Merlangius merlangus</i>    | <i>Eutrigla gurnardus</i>        | <i>Platichthys flesus</i>      |
| <i>Trachurus trachurus</i>     | <i>Leucoraja naevus</i>          | <i>Mustelus</i>                |
| <i>Pleuronectes platessa</i>   | <i>Micromesistius poutassou</i>  | <i>Dicentrarchus labrax</i>    |
| <i>Solea solea</i>             | <i>Microstomus kitt</i>          | <i>Microchirus</i>             |
| <i>Clupea harengus</i>         | <i>Dasyatis pastinaca</i>        | <i>Raja montagui</i>           |
| <i>Scomber scombrus</i>        | <i>Trachinus draco</i>           | <i>Pagellus bogaraveo</i>      |
| <i>Pollachius pollachius</i>   | <i>Alosa fallax</i>              | <i>Spondyliosoma cantharus</i> |
| <i>Scyliorhinus canicula</i>   | <i>Pagellus erythrinus</i>       |                                |
| <i>Chelidonichthys lucerna</i> | <i>Sparus aurata</i>             |                                |
| <b>Communauté II</b>           |                                  |                                |
| <i>Gadus morhua</i>            | <i>Galeorhinus galeus</i>        | <i>Scophthalmus maximus</i>    |
| <i>Raja clavata</i>            | <i>Anguilla anguilla</i>         | <i>Mustelus mustelus</i>       |
| <i>Scyliorhinus stellaris</i>  | <i>Balistes capriscus</i>        | <i>Leucoraja circularis</i>    |
| <i>Raja undulata</i>           | <i>Conger conger</i>             | <i>Mustelus asterias</i>       |
| <b>Communauté III</b>          |                                  |                                |
| <i>Sprattus sprattus</i>       | <i>Blennius ocellaris</i>        | <i>Pegusa lascaris</i>         |
| <i>Limanda limanda</i>         | <i>Hyperoplus lanceolatus</i>    | <i>Echiichthys vipera</i>      |
| <i>Callionymus lyra</i>        | <i>Ammodytes tobianus</i>        | <i>Chelon labrosus</i>         |
| <i>Trisopterus minutus</i>     | <i>Hippocampus hippocampus</i>   | <i>Alosa alosa</i>             |
| <i>Trisopterus luscus</i>      | <i>Liparis liparis</i>           | <i>Arnoglossus laterna</i>     |
| <i>Taurulus bubalis</i>        | <i>Atherina presbyter</i>        | <i>Buglossidium luteum</i>     |
| <i>Sardina pilchardus</i>      | <i>Lepadogaster lepadogaster</i> | <i>Osmerus eperlanus</i>       |
| <i>Scophthalmus rhombus</i>    | <i>Microchirus variegatus</i>    | <i>Engraulis encrasicolus</i>  |
| <i>Chelidonichthys cuculus</i> | <i>Ciliata mustela</i>           | <i>Zeugopterus punctatus</i>   |
| <i>Agonus cataphractus</i>     | <i>Labrus bergylta</i>           | <i>Mullus surmuletus</i>       |
| <b>Communauté IV</b>           |                                  |                                |
| <i>Zeus faber</i>              | <i>Belone belone</i>             | <i>Raja microocellata</i>      |
| <i>Trigla lyra</i>             | <i>Hyperoplus immaculatus</i>    |                                |
| <i>Lophius piscatorius</i>     | <i>Sarda sarda</i>               |                                |
| <b>Communauté V</b>            |                                  |                                |
| <i>Ostrea edulis</i>           | <i>Urticina felina</i>           | <i>Crepidula fornicata</i>     |
| <i>Metridium senile</i>        | <i>Mytilus edulis</i>            | <i>Psammechinus miliaris</i>   |
| <b>Communauté VI</b>           |                                  |                                |
| <i>Liocarcinus depurator</i>   | <i>Macropodia tenuirostris</i>   | <i>Homarus gammarus</i>        |
| <i>Cancer pagurus</i>          | <i>Ophiura albida</i>            | <i>Inachus dorsettensis</i>    |
| <i>Asterias rubens</i>         | <i>Pagurus bernhardus</i>        | <i>Crossaster papposus</i>     |
| <i>Ophiothrix fragilis</i>     | <i>Liocarcinus holsatus</i>      | <i>Crangon crangon</i>         |
| <i>Pisidia longicornis</i>     | <i>Necora puber</i>              | <i>Ophiura ophiura</i>         |
| <i>Pecten maximus</i>          | <i>Aequipecten opercularis</i>   | <i>Aphrodita aculeata</i>      |
| <i>Carcinus maenas</i>         | <i>Buccinum undatum</i>          |                                |
| <b>Communauté VII</b>          |                                  |                                |
| <i>Alcyonium digitatum</i>     | <i>Alcyonidium diaphanum</i>     | <i>Flustra foliacea</i>        |
| <b>Communauté VIII</b>         |                                  |                                |
| <i>Echinocardium cordatum</i>  | <i>Abra alba</i>                 |                                |
| <b>Communauté IX</b>           |                                  |                                |
| <i>Loligo</i>                  | <i>Loligo forbesii</i>           | <i>Sepiola</i>                 |
| <i>Loligo vulgaris</i>         | <i>Eledone cirrhosa</i>          |                                |
| <i>Sepia officinalis</i>       | <i>Alloteuthis</i>               |                                |

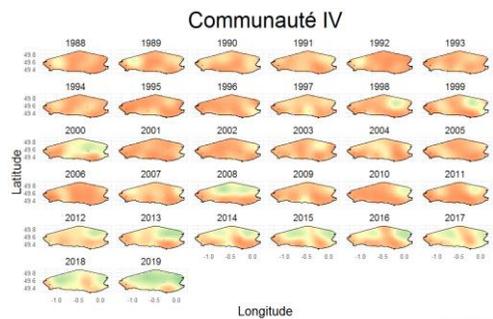
Annexe 11. Listes des taxons de la CGFS dont les traits sont disponibles, et ce pour chaque communauté résultant de la CAH (par le critère de Ward).



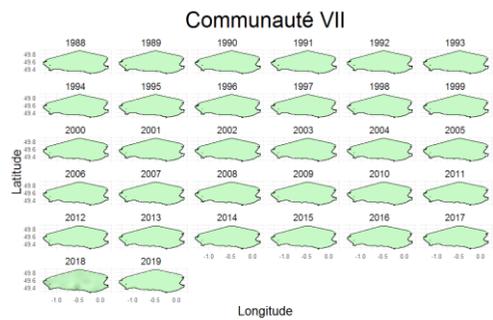
*Annexe 12. Variogrammes moyens et les modèles mathématiques associés pour chaque communauté d'espèces.*



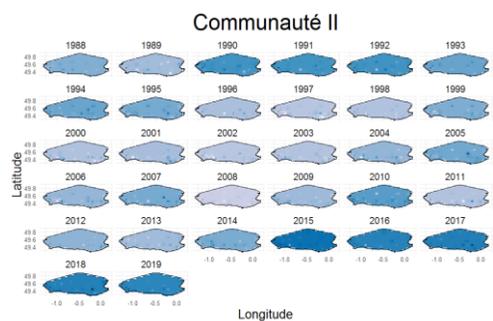
Densités interpolées standardisées



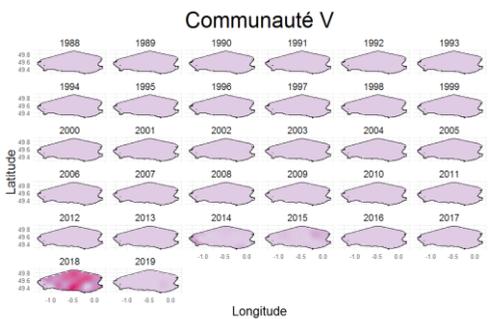
Densités interpolées standardisées



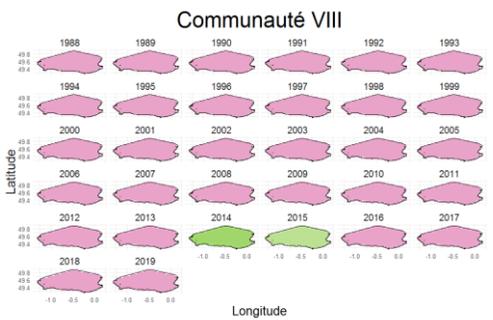
Densités interpolées standardisées



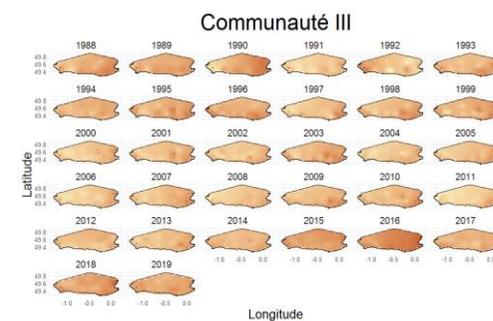
Densités interpolées standardisées



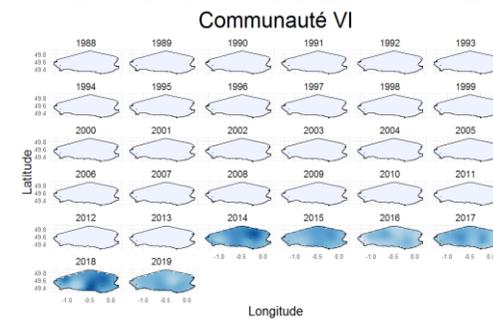
Densités interpolées standardisées



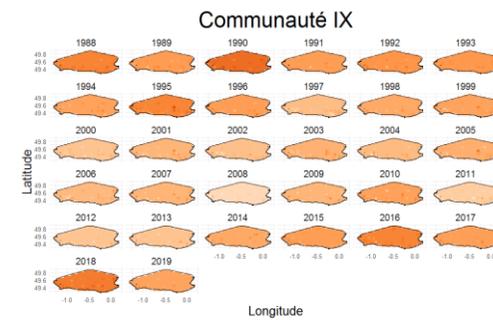
Densités interpolées standardisées



Densités interpolées standardisées

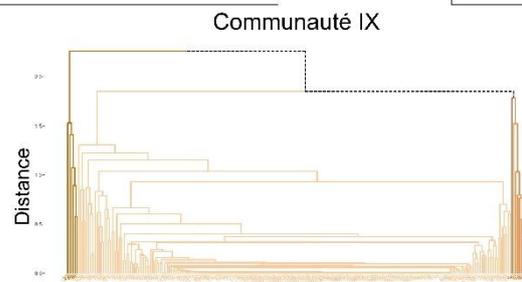
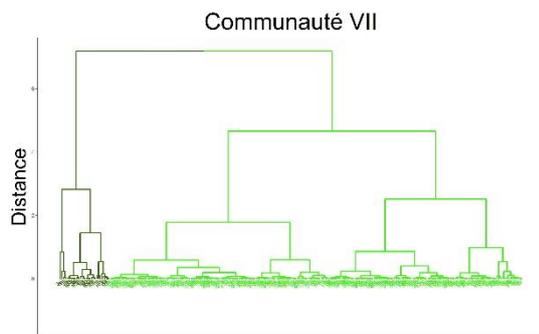
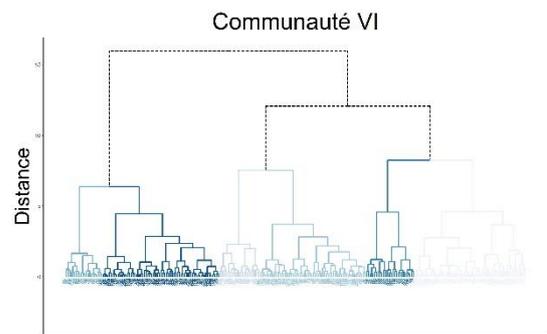
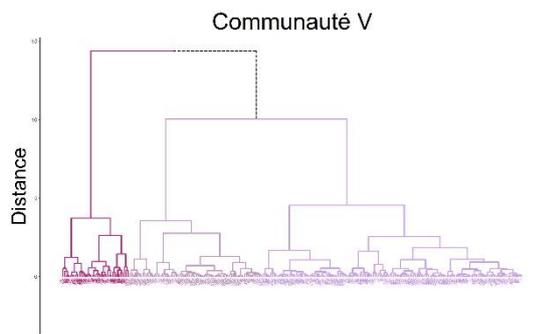
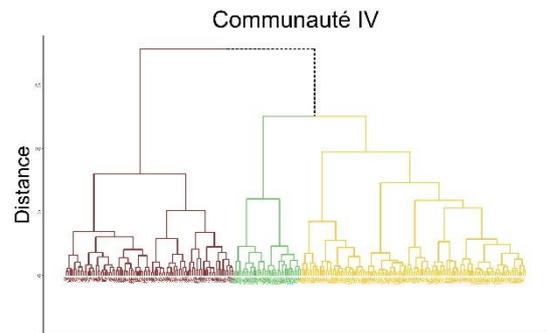
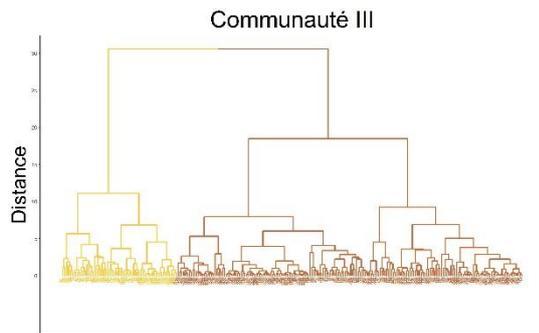
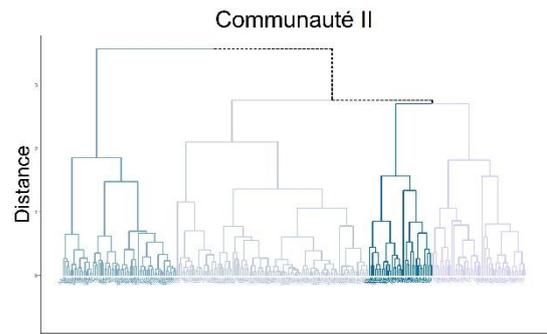
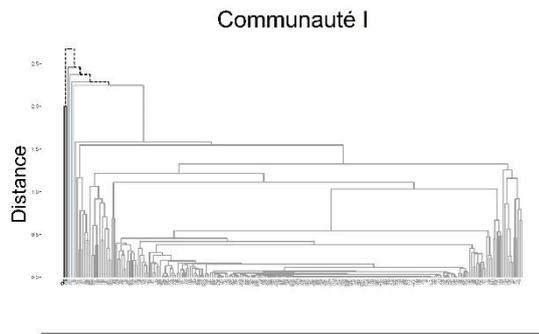


Densités interpolées standardisées

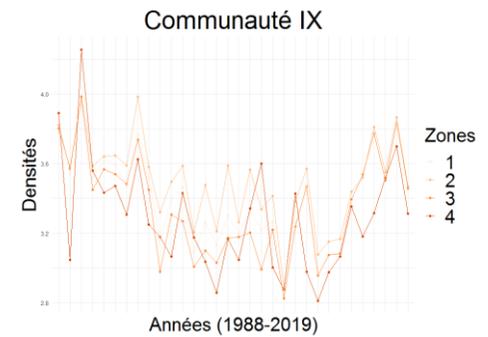
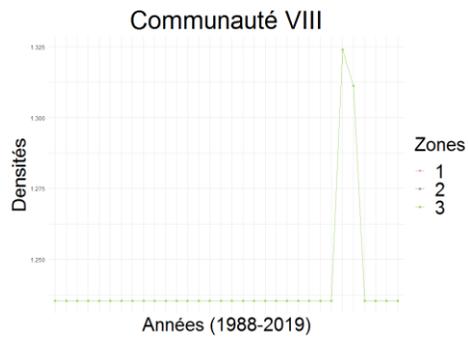
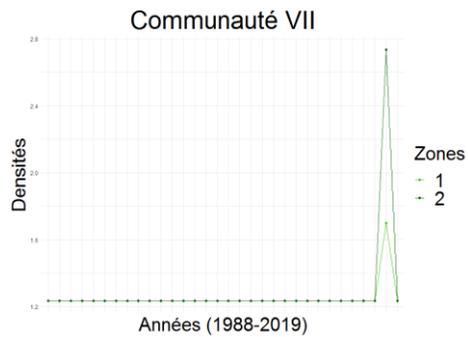
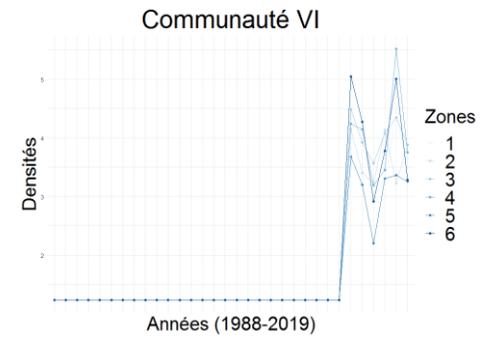
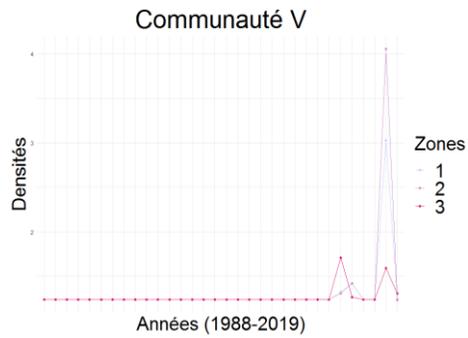
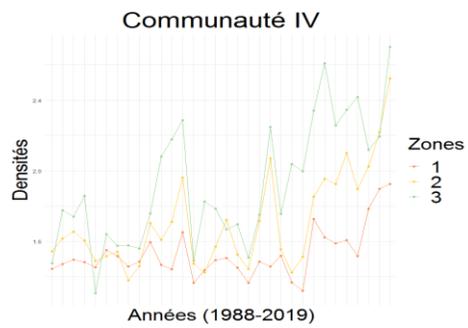
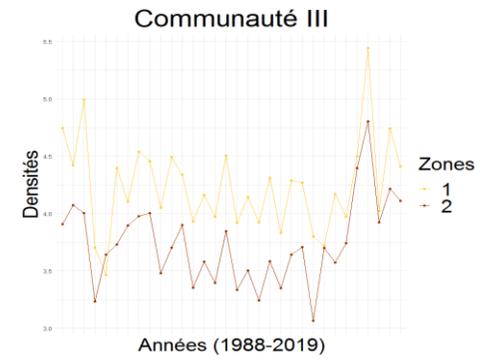
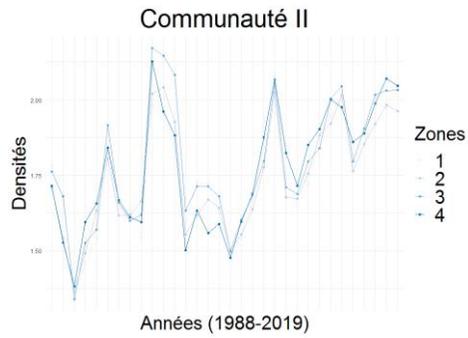
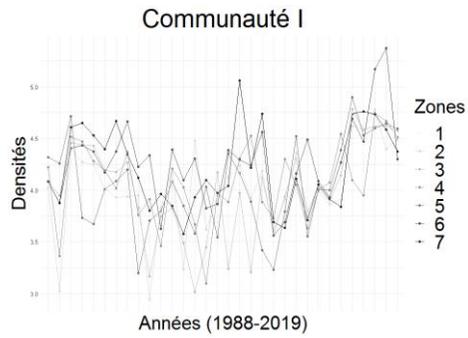


Densités interpolées standardisées

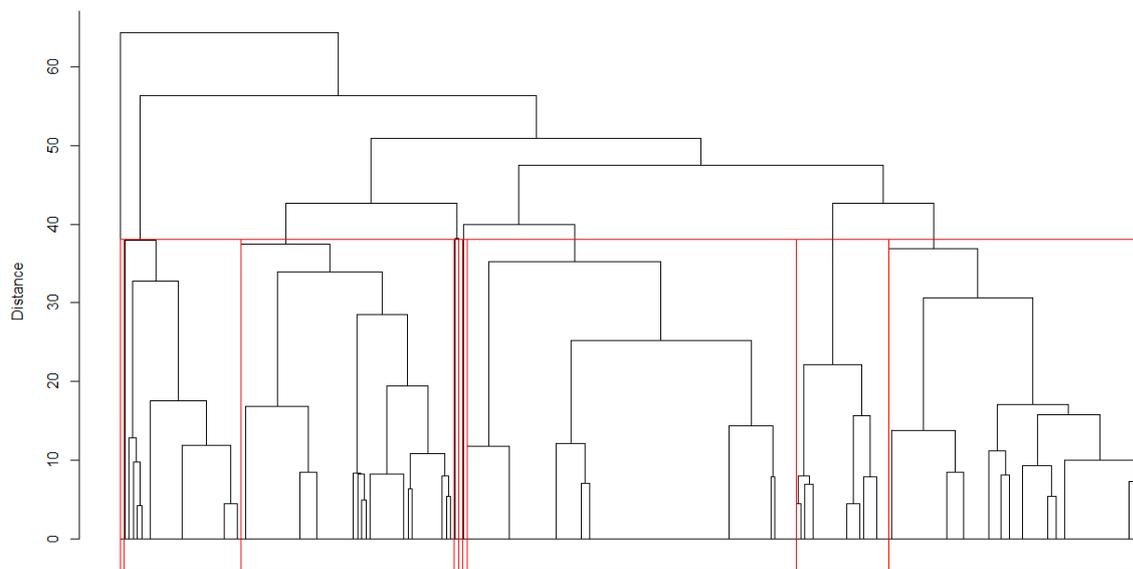
Annexe 13. Séries temporelles des densités interpolées (et passées au logarithme de base 10) pour chaque communauté.



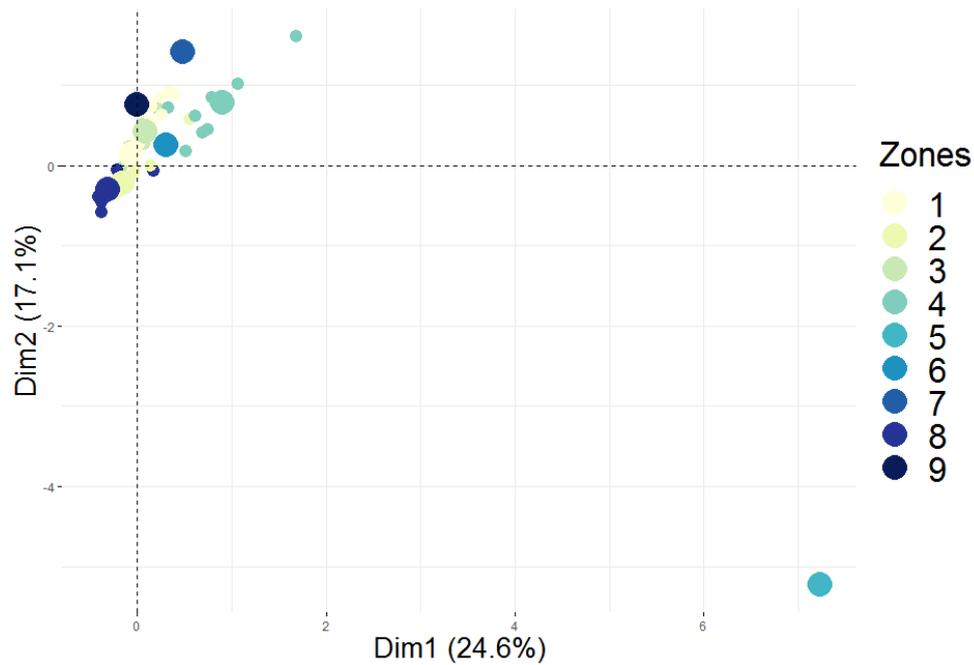
Annexe 14. Dendrogrammes résultant des CAH (par le critère de Ward) des neuf communautés biologiques, coupés selon la recommandation définie par le package R NbClust.



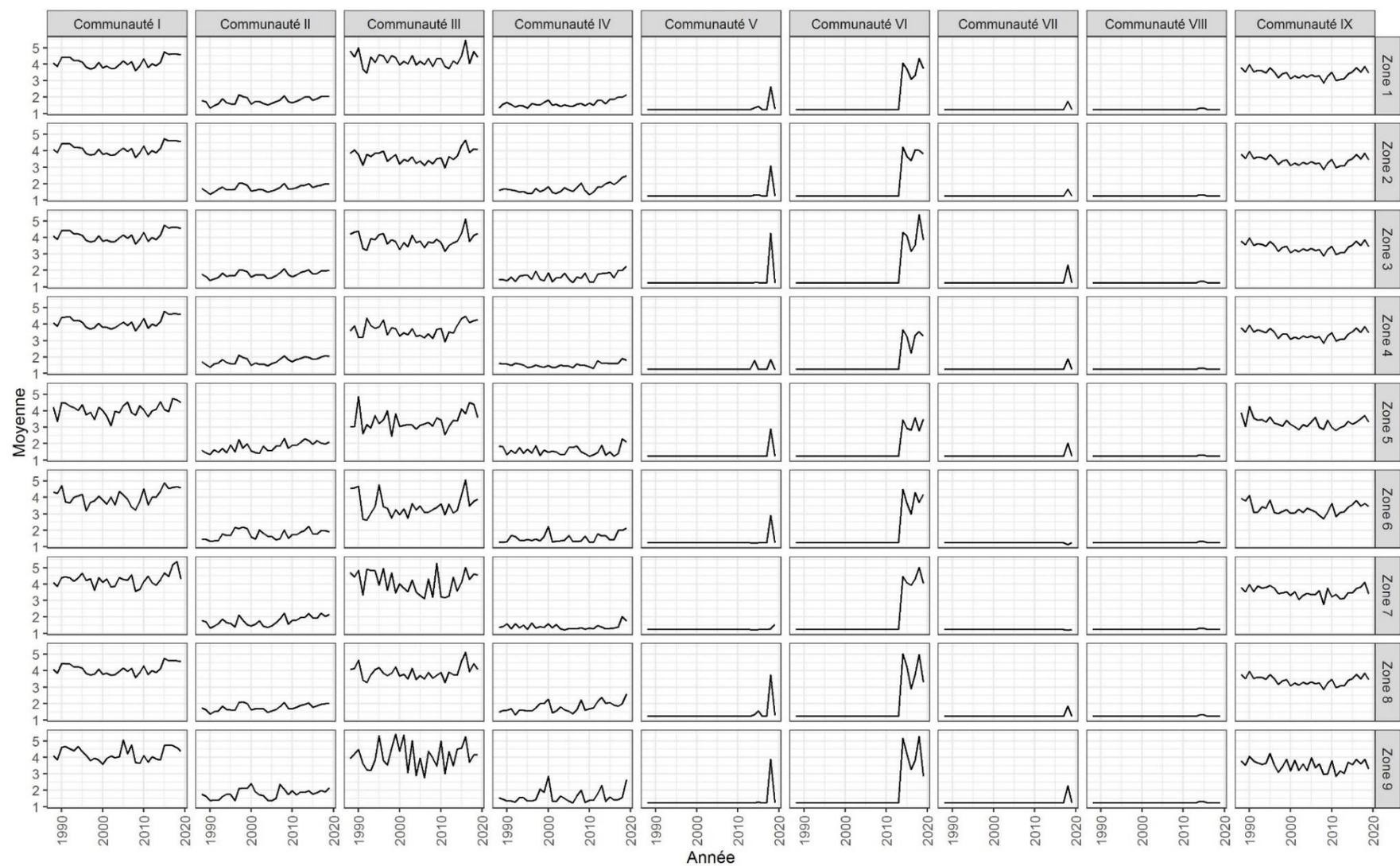
Annexe 15. Séries temporelles des densités de capture de chaque communauté biologique dans chacune des zones résultant de leur classification.



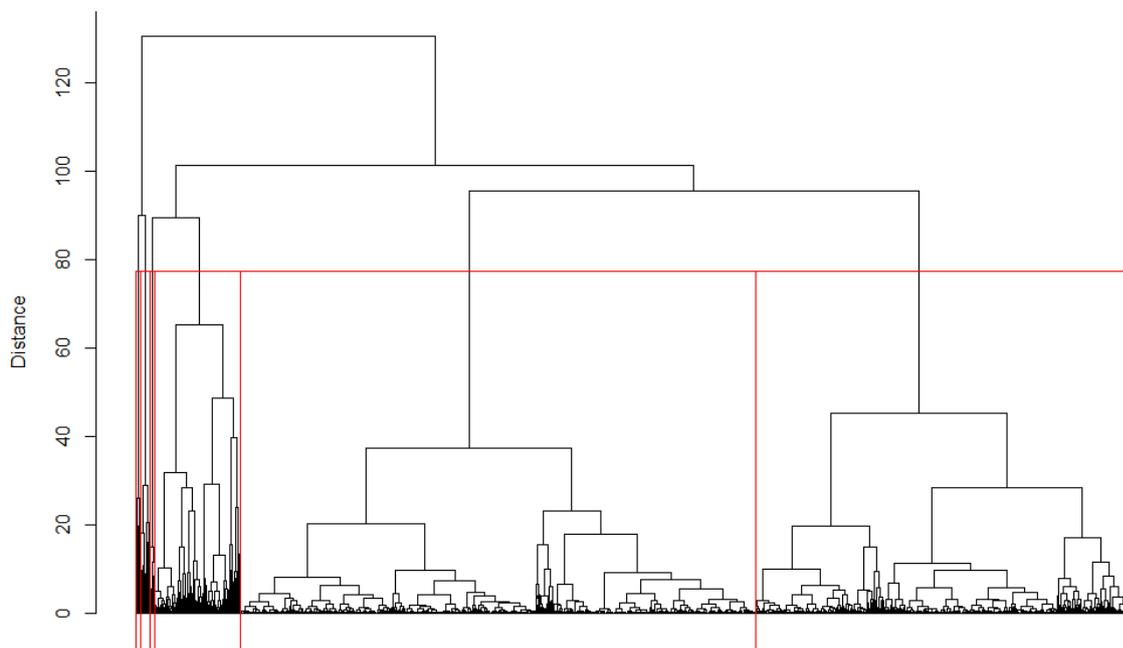
*Annexe 16. Dendrogramme résultant de la CAH (par le critère de Ward) des pixels de la baie en fonction de l'ensemble des communautés biologiques, coupé selon la recommandation définie par le package R NbClust.*



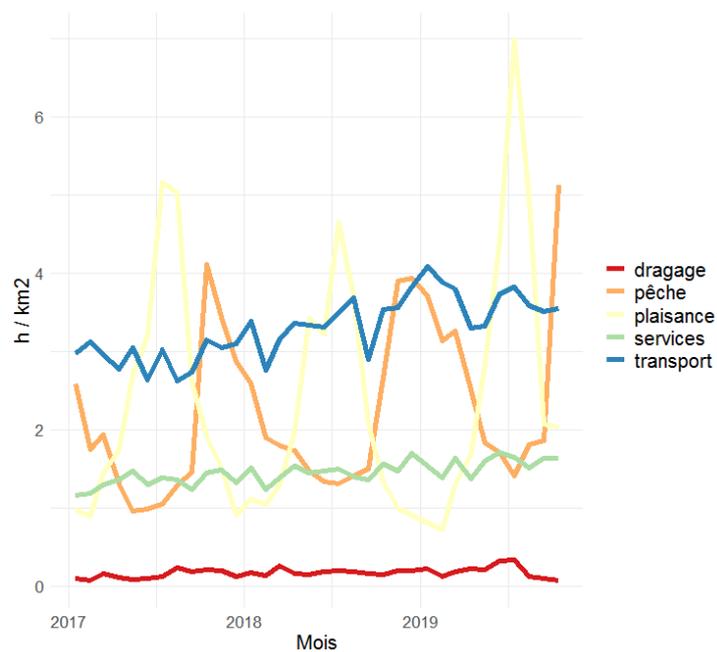
*Annexe 17. Nuage de points résultant de l'ACM réalisée sur tous les pixels de la baie en fonction des communautés biologiques, avec les zones qui leur sont associées après classification finale.*



*Annexe 18. Ensemble des séries temporelles des densités de chacune des neuf communautés (colonnes), et ce dans chaque zone de la régionalisation finale de la baie de Seine (lignes).*



*Annexe 19. Dendrogramme résultant de la CAH (par le critère de Ward) des pixels de la baie en fonction de l'ensemble des activités anthropiques, coupé selon la recommandation définie par le package R NbClust.*



*Annexe 20. Séries temporelles des densités de navires associées à chaque activité anthropique étudiée, sur les trois années de données disponibles.*



*Annexe 21. Cartographie des bancs d'Ophiothrix fragilis (zones vertes) en baie de Seine (extrait de Baffreau 2019).*

## Résumé

En raison de la multiplication des usages dans les eaux européennes, la planification marine spatiale (MSP) est une démarche particulièrement prometteuse. Cartographier les conditions existantes dans une région marine a pour vocation, dans le cadre de la MSP, d'y prédire les conditions futures. Cette anticipation de l'état de l'écosystème contribue ainsi à assurer sa préservation, tout en optimisant l'utilisation de l'espace marin souhaitée par l'Homme. Afin d'y parvenir, il est ainsi nécessaire de déterminer initialement les relations d'interdépendance qui lient les différentes composantes d'un écosystème. La démarche élaborée durant cette étude sert ainsi cet objectif, en mettant en parallèle le compartiment environnemental, la faune, l'occupation de l'espace marin par l'Homme et les usages qu'il en fait. Des traitements statistiques ont ainsi été menés sur un certain nombre de jeux de données, tous accessibles en ligne, et un large panel de résultats en ont été dégagés. L'ensemble de la méthode employée a été réfléchi de façon à être abordable et manipulable par tout type d'acteur, et a pour vocation de servir la recherche dans le domaine de la MSP. Ce rapport présente ainsi l'ensemble de la démarche qui a été menée, mais également le contexte dans lequel elle s'inscrit et le potentiel qu'elle représente en tant qu'outil de gestion d'une région marine, à travers un cas pratique et actuel de projet éolien en baie de Seine.

## Mots clé

Baie de Seine ; Reproductibilité ; Planification spatiale marine ; Régionalisation ; Traitements statistiques ; Ecosystémique

## Abstract

The continuous increase of uses in European waters makes marine spatial planning (MSP) a particularly promising process. In this context, the mapping of existing conditions in a marine area seeks to predict its future conditions. This anticipation of the ecosystem's health favors its preservation, while optimizing human activities. To achieve this, it is necessary to determine primarily interdependence relations that link the components of the ecosystem. The approach followed in this study serves this goal, by considering the environment, the fauna, the human occupation of marine space and the uses made of it side by side. Statistical treatments have been conducted on several datasets, all of them being accessible online, and many different kinds of results have been produced. The whole method has been thought in order to be accessible and manipulable by anyone, and seeks to serve research in the MSP field. This report presents the entire method used, as well as the context in which it is inscribed and the potential it represents as a tool for managing marine areas, through a practical and current project of windfarms in the bay of Seine.

## Keywords

Bay of Seine ; Reproducibility ; Marine Spatial Planning ; Regionalization ; Statistical analysis ; Ecosystemic