



DELphinus MOuvements GESTion

Mai 2024

Variations d'habitats potentiels des dauphins (dauphin commun et dauphin bleu et blanc) : une analyse exploratoire





Durée du projet : 3 ans

Date de lancement : 01/03/2022

Date de fin : 30/06/2025

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

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

Livrable

WP concerné : WP2

Responsables du WP : Doray Mathieu (Ifremer), Authier Matthieu (La Rochelle Université)

Livrable L.2.12

Date de production : 31 mai 2024

Titre : Variations d'habitats potentiels des dauphins (dauphin commun et dauphin bleu et blanc) : une analyse exploratoire

Auteurs : Authier Matthieu (La Rochelle Université), Genu Mathieu (La Rochelle Université), Laran Sophie (La Rochelle Université), Spitz Jérôme (La Rochelle Université, CEBC CNRS).

Résumé

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

Ce livrable rapporte une analyse descriptive des variations de l'habitat potentiel des dauphins communs dans le golfe de Gascogne. Il est choisi de décrire l'habitat par 6 covariables environnementales dans 3 grandes catégories (variables physiographiques, variables océanographiques, et distances à des isobathes). Cet habitat est qualifié de « potentiel » car les variables utilisées ici sont au mieux des proxy de phénomènes complexes mais peuvent néanmoins être prédictives de l'habitat d'alimentation des dauphins. Deux échelles spatiales sont étudiées : une large échelle et une échelle plus locale. Les données utilisées sont issues des campagnes aériennes par observation visuelle SAMM et SPEE car celles-ci couvrent la saison hivernale qui concentre l'essentiel des événements de captures accidentelles. En outre dix ans séparent les campagnes à grande échelle SAMM, permettant une exploration avant et après le début des pics d'échouages observés depuis 2017. Les campagnes SPEE sont à l'échelle du Parc Naturel Marin de la Mer des Pertuis et de l'Estuaire de la Gironde et ont commencé en 2019. A cette échelle, les variations saisonnières sont décrites.

Dissémination

Type de livrable : rapport

Public : Oui

Lieux de stockage : site web de Pelagis, site web Delmoges

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des observateurs ayant collecté les données d'observations aériennes utilisées pour cette analyse. Nous remercions Mathieu Doray pour sa relecture critique et ses commentaires qui ont permis d'améliorer ce document.

Les données utilisées pour ce livrable sont incluses dans le package pelarrp (L331 ; Authier et al. 2023)

Consortium scientifique



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

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



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

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



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

www.ifremer.fr/



Université
de Bretagne
Occidentale

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

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



COMITÉ NATIONAL
DES PÊCHES MARITIMES
ET DES ÉLEVAGES MARINS

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

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

Table des matières

1	Contexte	6
1.1	Contexte environnemental et scientifique.....	6
1.2	Rôle du livrable	6
1.3	Acronymes et abréviations	6
2	Campagnes aériennes	7
2.1	Large echelle	7
2.2	Echelle Locale	9
3	Covariables environnementales.....	11
	Choix des covariables	12
3.1	Correlations avec les observations de dauphins	13
3.1.1	Large échelle.....	14
3.1.2	Echelle locale	17
4	Discussion.....	19
5	Bibliographie	21
6	Annexes	23

1 Contexte

1.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET SCIENTIFIQUE

L'objectif de cette tâche au sein du workpackage 2 est d'explorer les variables physiographiques (profondeur, pente du plancher océanique) et océanographiques (température de surface de l'eau, concentration en chlorophylle a de l'eau) afin d'identifier les changements intervenus dans l'écosystème du golfe de Gascogne sur les 10 dernières années en relation avec les observations de dauphins communs.

Pour ce faire une analyse exploratoire est réalisée en corrélant observations de dauphins à deux échelles spatiales (large et locale) sur plusieurs années et saisons. Cette analyse repose sur l'estimation de corrélations entre le nombre de dauphins et 6 covariables environnementales susceptibles de prédire l'habitat potentiel d'alimentation des dauphins (dauphin commun *Delphinus delphis*, et dauphin bleu et blanc *Stenella coeruleoalba*) dans le golfe de Gascogne.

1.2 ROLE DU LIVRABLE

Ce livrable a pour objet d'explorer les changements dans les observations de dauphins par observation aérienne en fonction de covariables environnementales importantes comme la chlorophylle a (un proxy de la biomasse phytoplanctonique, voir L211) ou la température de surface des eaux. L'analyse est exploratoire car ne reposant pas sur de la modélisation. Ce choix est opéré afin de décrire dans un premier temps un habitat d'alimentation à partir d'un petit nombre (6) de covariables environnementales (dont celles étudiées précédemment dans le L211). Cet habitat est potentiel car (i) deux espèces de dauphins sont regroupées pour l'analyse et (ii) les covariables utilisées ici sont des proxy de phénomènes plus complexes. Cette analyse exploratoire vise à ouvrir, à terme, les pistes pour des travaux plus complexes de modélisation.

1.3 ACRONYMES ET ABREVIATIONS

SAMM	Suivi A érien de la M égafaune M arine*
SPEE	Suivi de la mégafaune marine au large des P ertuis charentais, de l' E stuaire de la Gironde et de Rochebonne par observation aérienne*
CAPECET	Suivis aériens afin de comprendre et évaluer les C aptures de P etits C ETacés*

* www.observatoire-pelagis.cnrs.fr/pelagis-2/les-programmes

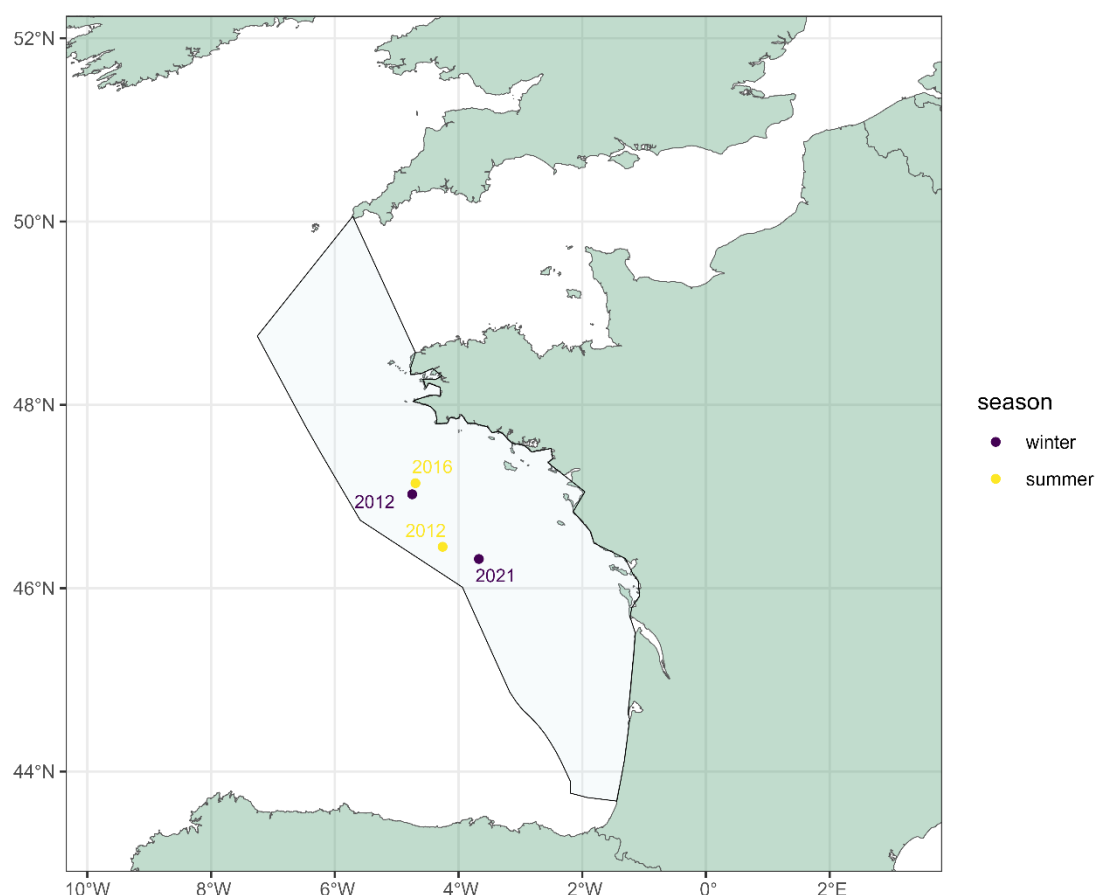
2 Campagnes aériennes

La méthodologie utilisée lors des campagnes aériennes pour la collecte des données sur les petits delphininés (dans la suite du document, dauphins) est détaillée dans Laran et al. (2022a,b). En outre, elle est la même que celle mise en œuvre lors des survols CAPECET (voir L313, Van Canneyt et al. 2024). Les deux espèces concernées par l'analyse sont le dauphin commun (*Delphinus delphis*) et le dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*). Ces deux espèces sont regroupées du fait de difficultés d'identification par observation visuelle avant le développement d'un système de validation par photo digitale à haute résolution déployé lors des campagnes plus récentes. Par ailleurs, le risque de capture accidentelle s'applique potentiellement aux deux espèces bien que le dauphin commun soit l'espèce la plus affectée.

Dans la suite, une brève présentation des données utilisées est faite. L'analyse étant exploratoire, les inférences sont restreintes et les statistiques fournies sont principalement descriptives. Par exemple, une statistique descriptive est le centre de gravité spatial des observations de dauphins. Celui-ci est calculé sur les données collectées (Woillez et al. 2007). Dans le cas de dauphins, la zone couverte par les campagnes est restreinte par rapport à la distribution des dauphins dans l'Atlantique Nord-Est (Geelhoed et al. 2022, Gilles et al. 2023). Le centre de gravité est une statistique descriptive pour la zone d'étude mais n'est pas représentative pour la population de dauphins à l'échelle de l'Atlantique Nord-Est. Nonobstant cette limitation, la couverture systématique de la même zone géographique permet d'apprécier d'éventuels changements à l'échelle de cette zone.

2.1 LARGE ECHELLE

Les campagnes SAMM (Suivi Aérien de la Mégafaune Marine, cycles I et II) ont pour objectif de suivre la distribution spatiale et de l'abondance relative des cétacés, des oiseaux marins, et d'autres espèces de la mégafaune marine dans les eaux sous juridiction de la France en été et en hiver (Laran et al. 2017 ; Laran et al. 2022). La première campagne SAMM a eu lieu en hiver 2011-2012 et la dernière correspond à la campagne SCANS-IV de l'été 2022 (dont l'analyse des données est encore en cours). Les données utilisées ici correspondent aux cycles I et II des campagnes SAMM. L'emprise couverte par les campagnes dans l'Atlantique Nord-Est varie et la zone couverte de manière systématique est représentée sur le graphique 1 ci-dessous (voir annexe 1 pour une cartographie lissée par 'blocking' des données ; Petitgas et al. 2014). Cette zone couvre le plateau du golfe de Gascogne. Le centre de gravité des observations de dauphins est symbolisé par un point (Woillez et al. 2007) : ce centre de gravité s'est déplacé pour la saison hivernale entre 2012 et 2021 (la différence est d'environ 120 km vers le sud-est), et est plus au nord pour la saison estivale entre 2012 et 2016 (la différence est d'environ 80 km vers le nord-ouest). L'inertie a augmenté uniquement en hiver entre 2012 et 2021 : la distribution des dauphins est plus diffuse en hiver 2021 par rapport à l'hiver 2012.



Graphique 1 : Emprise géographique de zone systématiquement couverte par les campagnes SAMM (cycle I et II) entre 2012 et 2021. Les points représentent les centres de gravité des observations de dauphins communs dans cette zone.

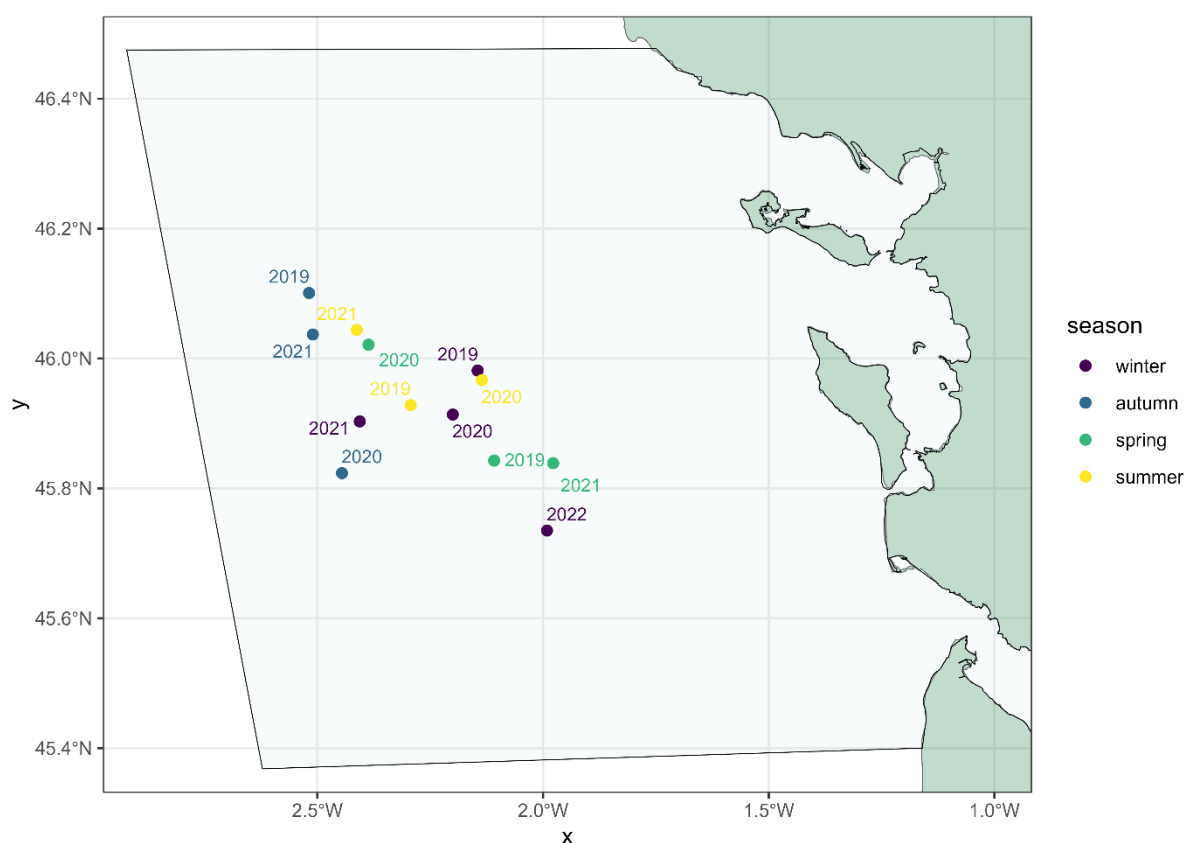
Le tableau 1 récapitule les données utilisées : un changement notable du rapport entre nombre d'individus et nombre de détections par segment de 10 km d'effort est évident entre 2012 et 2016 pour la saison estivale. Le nombre de détections de dauphins par unité d'effort de prospection est plus élevé sur le cycle II comparé au premier cycle pour les deux saisons.

Tableau 1 : Statistiques descriptives des données d'observations de petits delphininés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) collectées dans la zone d'étude à large échelle (Graphique 1).

Saison	Année	Dates	Effort (km)	Nb de détections	Nb d'individus	Nb de détections par km	Nb d'individus par nb de détections
Hiver	2012	17/11/2011 - 11/02/2012	7254	207	1681	0.029	8.1
Hiver	2021	11/01/2021 - 25/03/2021	7872	376	2873	0.048	7.6
Eté	2012	16/05/2012 - 07/08/2012	8034	120	2445	0.015	20.4
Eté	2016	29/06/2016 - 25/07/2016	7223	549	5151	0.076	5.7

2.2 ECHELLE LOCALE

L'objectif principal de la campagne SPEE (Suivi de la mégafaune marine au large des PERTUIS charentais, de l'Estuaire de la Gironde et de Rochebonne par observation aérienne) est de collecter de nouvelles données sur l'abondance et la distribution de la mégafaune marine au sein du périmètre du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis ainsi que celui des ZPS « Pertuis charentais-Rochebonne » et « Panache de la Gironde ». Cette campagne d'acquisition de données via l'observation aérienne (menée avec un protocole similaire aux campagnes à large échelle) cible oiseaux marins, mammifères marins, tortues marines, raies, requins et grands poissons visibles, macro déchets flottants en surface ainsi que la fréquentation nautique (pêche, plaisance, trafic maritime, engins de pêche ; Laran et al. 2022b). Les survols ont eu lieu à chaque saison entre 2019 et 2021, suivi d'un survol en hiver 2022. La zone couverte est constante (Graphique 2). Des variations saisonnières dans les centres de gravités des observations de dauphins communs sont visibles sur le graphique 2, bien que ces variations n'excèdent pas 60 km (entre l'automne 2019 et l'hiver 2022). D'une manière générale, ces centres de gravité sont les plus éloignés des côtes en automne et les plus proches au printemps (Graphique 2).



Graphique 2 : Emprise géographique systématique des campagnes SPEE entre 2019 et 2022. Les points représentent les centres de gravité des observations de dauphins par couple année-saison.

Le tableau 2 récapitule les données utilisées à l'échelle locale. Le nombre de détections de dauphins communs par unité d'effort de prospection est plus élevé en hiver et augmente entre 2019 et 2022. Il est le plus faible en moyenne sur la saison estivale.

Tableau 2 : Statistiques descriptives des données d'observations de petits delphininés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) par segment de 10 km d'effort utilisées à échelle locale (Graphique 2).

Saison	Année	Dates	Effort (km)	Nb de détections	Nb d'individus	Nb de détections par km	Nb d'individus par nb de détections
Hiver	2019	12/02 - 27/02	3027	101	711	0.033	7.0
Hiver	2020	07/02 - 22/02	3450	135	743	0.039	5.5
Hiver	2021	10/02 - 25/03	1659	95	734	0.057	7.7
Hiver	2022	14/01 - 02/03	3473	282	1867	0.081	6.6
Automne	2019	25/10 - 19/11	2816	17	64	0.006	3.8
Automne	2020	16/10 - 12/11	3443	29	160	0.008	5.5
Automne	2021	25/10 - 06/11	2577	110	554	0.043	5.0
Été	2019	31/07 - 08/08	3263	40	191	0.012	4.8
Été	2020	04/08 - 07/08	3360	62	577	0.018	9.3
Été	2021	09/08 - 11/08	2573	17	100	0.007	5.9
Printemps	2019	30/05 - 03/06	3041	24	182	0.008	7.6
Printemps	2020	19/05 - 22/05	3237	36	359	0.011	10.0
Printemps	2021	26/05 - 28/05	2544	43	243	0.017	5.7

3 Covariables environnementales

Afin de mener une analyse exploratoire facilement interprétable, un petit nombre de covariables environnementales a été considéré. Celles-ci incluent des covariables physiographiques comme la profondeur et l'inclinaison du fond marin (pente) qui sont à défaut d'être directement causales, sont néanmoins prédictives de la distribution des cétacés (par exemple, Becker et al. 2022 ; Laran et al. 2022a,b). Des covariables océanographiques précédemment identifiées comme forçantes de l'écosystème du golfe de Gascogne et soumises à des changements sur les 20 dernières années sont également incluses : la température de surface de la mer (mSST) et la concentration en chlorophylle a de l'eau (mCHL ; Huguet et al. 2023). Enfin des covariables statiques comme la distance à la côte (distCoast) et à l'isobathe des 200 m (iso200) de profondeur sont considérées : ces variables sont dérivées des variables physiographiques (et plus précisément de la bathymétrie). Ces variables ne sont pas causales mais peuvent néanmoins être prédictives et être utiles dans une optique de gestion.

Les covariables environnementales ont été téléchargées puis associées au fichier de centroïde de l'effort de prospection aérienne (segmenté à une échelle de ≈ 10 km) à l'aide du logiciel ArcGIS 10.6 et de l'extension MGET (Roberts et al. 2010). Les covariables océanographiques ont été collectées à la résolution mensuelle/4 km, correspondant à l'effort de prospection (Laran et al. 2022a,b). La base de données Gebco à 1 min/15 km de résolution (2020) a été utilisée pour obtenir la profondeur en mètre, la pente en degrés et les distances à la côte et l'isobathe des 200 m en km. La température de surface de l'eau est extraite du produit 'SST Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis' (<https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1>) pour les données à large échelle (Laran et al. 2022a) et du produit PO.DAAC MODIS L3 (https://podaac-www.jpl.nasa.gov/dataset/MODIS_AQUA_L3_SST_THERMAL_ANNUAL_4KM_NIGHTTIME) pour les données à l'échelle locale (Laran et al. 2022b). La concentration en chlorophylle a de l'eau est extraite du produit 'CHLa Ocean Color resolution 4KM' (https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_104/description) issu du satellite AquaModis pour les données à large échelle (Laran et al. 2022a) et à l'échelle locale (Laran et al. 2022b).

CHOIX DES COVARIABLES

L'habitat potentiel des dauphins est défini dans cette analyse par 6 covariables (Tableau 3).

Tableau 3 : Covariables environnementales

Covariable	code	Type	unité
Profondeur	depth	Physiographique	m
Pente	slope		°
Température de surface de la mer	mSST	Océanographique	°C
Concentration de l'eau de mer en chlorophylle a	mCHL		mg/m ³
Distance à la côte	distCoast	Distance (dérivée de la bathymétrie)	km
Distance à l'isobathe des 200 m	iso200		km

Ces 6 covariables sont de trois types : physiographiques, océanographiques et des distances. La justification pour cette inclusion à priori d'un nombre restreint de covariables est de favoriser l'interprétation de l'analyse exploratoire. Pour ce faire, cette dernière utilise la corrélation de demi-distance ('semi-distance correlation' ; Zhong et al. 2023) qui permet de capturer des dépendances non-linéaires entre une variable d'intérêt (dans le cas présent, le nombre d'animaux vus lors des campagnes aériennes) et un ensemble d'autres covariables. Cette corrélation de semi-distance est comprise entre 0 et 1 ; et n'est égale à 0 que dans le cas d'une indépendance statistique stricte entre la variable d'intérêt et les covariables (à l'inverse d'un coefficient de corrélation de Spearman ou de Pearson, celui-ci ne donne pas le sens de la relation avec la covariable). Cette nouvelle corrélation est intéressante dans le cas présent puisque des relations non-linéaires entre covariables environnementales et abondance des dauphins sont la norme (e.g. Becker et al. 2022 ; Laran et al. 2022a,b). L'analyse par corrélation de semi-distance est faite au niveau du segment, ceux-ci étant homogènes par rapport à l'effort de prospection.

Zhong et al. (2023) propose une extension de cette corrélation pour des variables catégorielles, extension adaptée dans le cas présent puisque les données sont des comptages d'animaux (des entiers naturels pour lesquels une hypothèse d'une distribution Gaussienne n'est, en général, pas appropriée). En outre, cette corrélation permet de résumer en un chiffre compris entre 0 et 1, la dépendance entre nombre de dauphins par segment de 10 km et covariables environnementales, et d'explorer les variations entre saisons et années à deux échelles spatiales.

3.1 CORRELATIONS AVEC LES OBSERVATIONS DE DAUPHINS

Les analyses ont été réalisées à l’aide du logiciel *R* v.4.2.2 (R Core Team 2022) en utilisant les bibliothèques *sf* (Pebesma et Bivand 2023) et le *tidyverse* (Wickham et al. 2019). Les données de comptages ont été regroupées en catégories (Tableau 4) avant leur analyse.

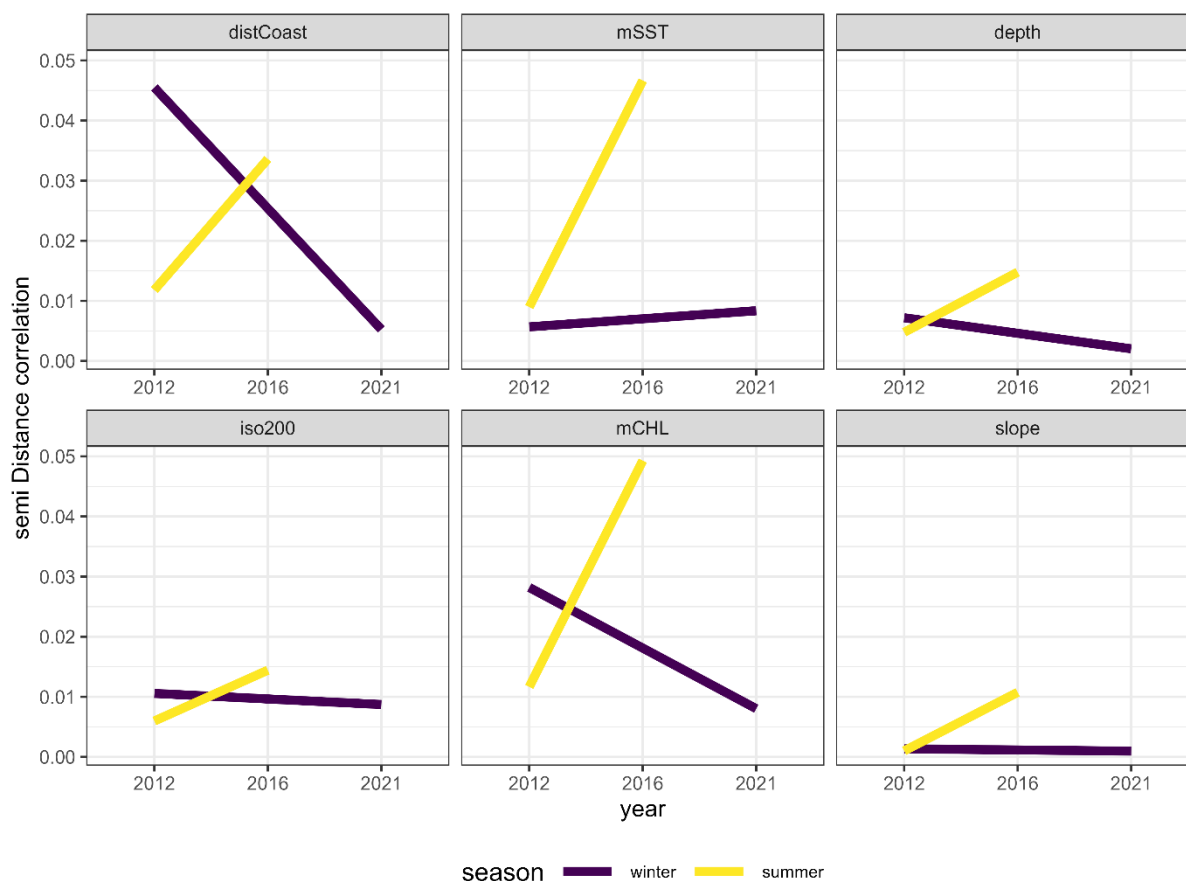
Tableau 4 : Taille d’échantillon pour la variable d’intérêt (le nombre d’animaux par segment de 10 km d’effort vu lors des campagnes aériennes) et corrélation de semi-distance avec les types de covariables environnementales.

Echelle	Nombre de dauphins (taille d’échantillon)				Covariable (corrélation de semi-distance)		
	[0]	]0; 10]	]10;50]	50+	Physiographique	Océanographique	Distance
Large	2775	282	184	38	0.003	0.008	0.013
Locale	3755	293	163	16	0.021	0.022	0.027

Le tableau 4 rapporte également les valeurs des corrélations de semi-distance entre le nombre de dauphins et les grands types de covariables environnementales sur l’ensemble des données, sans distinguer par couple saison-année. Ces premiers résultats montrent des corrélations faibles, mais non nulles, avec des valeurs plus fortes pour les covariables ‘distance’ aux deux échelles spatiales considérées.

3.1.1 Large échelle

L'analyse des données à large échelle concerne les animaux observés sur le plateau du golfe de Gascogne (Graphique 1). Les corrélations avec les covariables environnementales en fonction des couples saison-année sont représentées sur le graphique 3 (voir Annexe 3 pour les valeurs de significativité statistique).

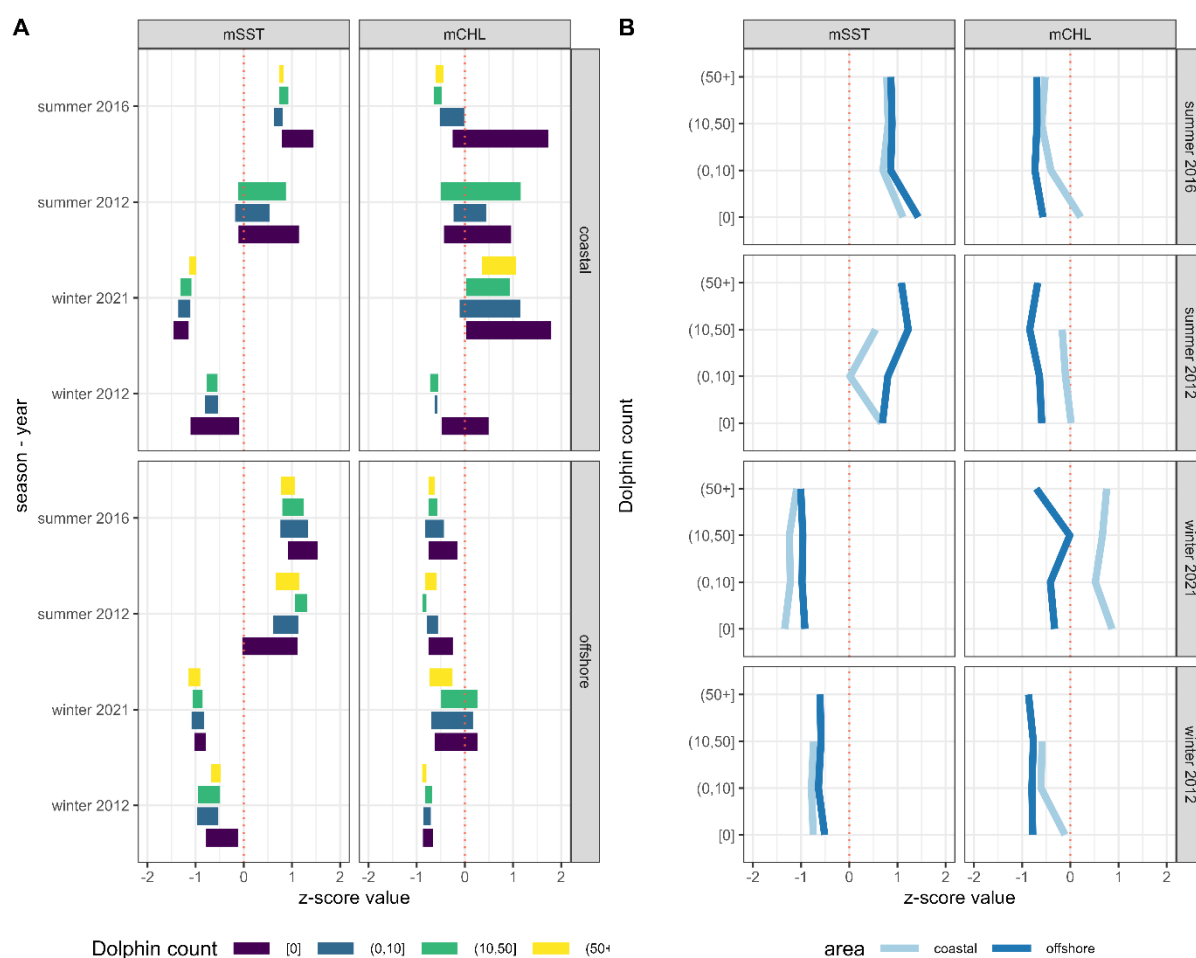


Graphique 3 : Corrélations de semi-distance entre nombre de dauphins et les covariables environnementales à large échelle.

Des patrons différents par covariable en fonction des saisons sont évidents sur le graphique 3 : pour la saison estivale, toutes les corrélations augmentent en valeur entre 2012 et 2016, suggérant une plus forte dépendance entre les effectifs de dauphins dénombrés sur les campagnes aériennes et l'habitat potentiel défini par les covariables environnementales. A l'inverse, pour la saison hivernale, les valeurs de corrélation de semi-distance diminuent entre 2012 et 2021 pour les covariables 'distance à la côte', 'profondeur' et 'concentration de chlorophylle a'. La corrélation avec les covariables 'distance à l'isobathe des 200 m' et 'pente' restent stable pendant la saison hivernale. Enfin la corrélation pour la covariable 'température de surface de la mer' augmente entre 2012 et 2021 pour cette saison hivernale. Ces changements suggèrent un changement dans l'habitat potentiel aussi bien en été qu'en hiver. Les corrélations ne donnent pas la valence (ou direction) de la relation entre nombre de dauphins et covariables environnementales. Cette valence n'est pas nécessairement que positive ou négative dans le cas de relation non-linéaires comme attendues dans le cas

présent. Néanmoins, afin de mieux comprendre ces relations, une dernière analyse graphique est faite en représentant les 50% des valeurs de chaque covariable par modalité du nombre de dauphins (Tableau 4) sur le graphique 4. Une différence est faite entre une zone côtière définie comme comprise entre le trait de côte et l'isobathe des 200 m ; et une zone 'offshore' au-delà de l'isobathe des 200 m. Ces deux zones résument l'information apportée par l'inclusion des covariables 'distance' (Tableau 3).

Afin de faciliter la lecture, seule les variables océanographiques sont représentées, celles-ci ayant été préalablement étudiées par Huguet et al. (2023).



Graphique 4 : (A) « Boîte à moustache » des covariables océanographiques en fonction du nombre de dauphins observés par campagne aérienne et des zones côtières ou 'offshore' dans le golfe de Gascogne (voir Graphique 1 et Annexe 1). Les boîtes représentent 50% des valeurs, celles comprises entre le premier et troisième quartile. Les valeurs sur l'axe des abscisses sont centrées et réduites : la valeur 0 correspond à la moyenne de l'ensemble des données à grande échelle (c'est-à-dire pour les toutes années et saisons) et les graduations sont en unités d'écart-type. (B) Médiane des valeurs pour les covariables océanographiques.

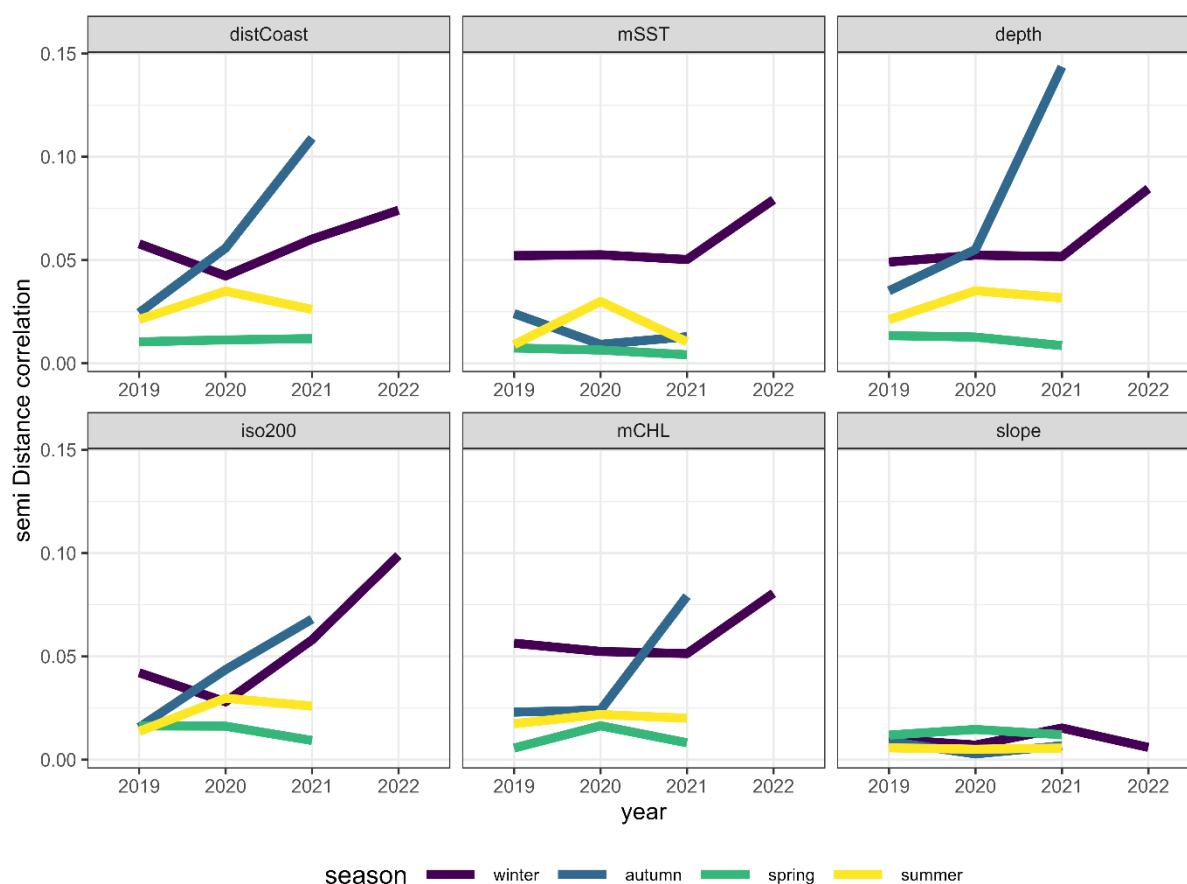
Le graphique 4 permet de visualiser les associations entre les valeurs de covariables et le nombre de dauphins observés lors des campagnes aériennes. Ces associations sont plus facilement lisibles sur le graphique 4B (Table 4) pour un couple saison-année donné. La représentation choisie permet de se concentrer sur les variations des relations entre

différents paramètres (côtier/offshore, covariable, saison, année). Le graphique 4 révèle des différences entre saison, années et zone côtière/'offshore'. Concernant la covariable 'température de la surface de la mer', aucune relation n'est apparente en zone côtière en été 2012 alors que des plus grands groupes de dauphins sont associés positivement à des températures plus élevées que la moyenne en zone 'offshore' (Graphique 4B). En 2016, de plus grands groupes de dauphins sont associés négativement à des températures plus élevées aussi bien en zone côtière qu'en zone 'offshore'. En outre, des températures plus fortes sont relevées en zone côtière en 2016 par rapport à 2012. Cela est également le cas, mais dans une moindre mesure, pour la zone 'offshore'. En hiver 2012, les effectifs non nuls de dauphins sont associés à des valeurs de température de surface de la mer plus faibles que la moyenne en zone côtière et en zone 'offshore'. En hiver 2021, une association positive entre nombre de dauphins et température de surface de la mer est manifeste en zone côtière, mais elle est négative en zone 'offshore'.

Concernant la covariable 'concentration en chlorophylle a', en été 2012, aucune association n'est évidente en zone côtière mais une association négative est observée en zone 'offshore'. En été 2016, les associations sont négatives aussi bien en zone côtière qu'en zone 'offshore'. En outre, des valeurs plus faibles sont relevées en zone côtière en 2016 par rapport à 2012. Cela n'est pas le cas pour la zone 'offshore'. En hiver, une association négative est apparente aussi bien en zone côtière qu'en zone 'offshore' en 2012 et 2021. Toutefois, les valeurs de 'concentration en chlorophylle a' sont globalement plus élevées pendant la campagne de 2021 par rapport à celle de 2012.

3.1.2 Echelle locale

L'analyse des données à échelle locale concerne les animaux observés sur le plateau du golfe de Gascogne au large de l'estuaire de la Gironde et des îles de Charente-Maritime (Graphique 2). Les corrélations de semi-distance avec les covariables environnementales en fonction des couples saison-année sont représentées sur le graphique 5 (voir Annexe 4 pour les valeurs de significativité statistique).

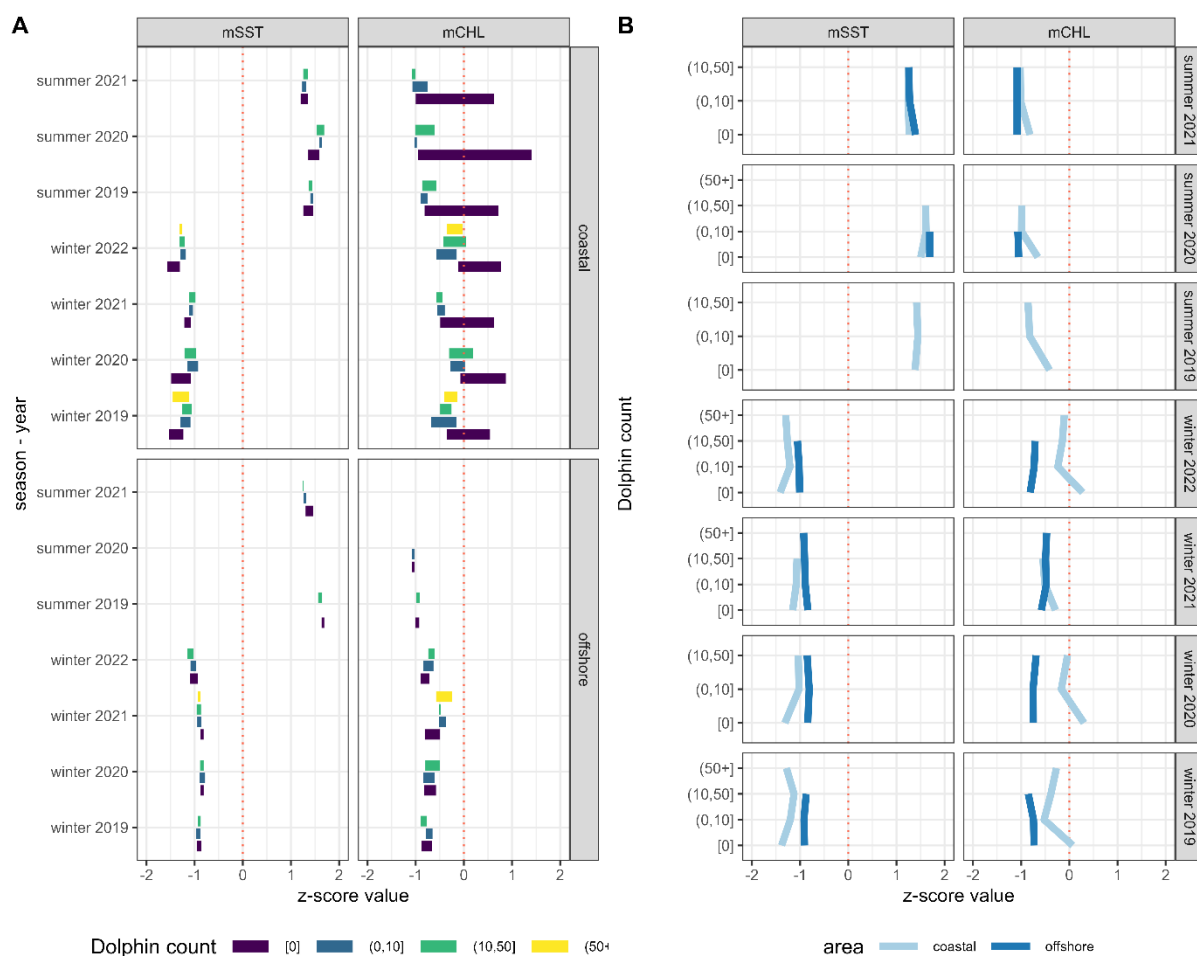


Graphique 5 : Corrélations de semi-distance entre nombre de dauphins et les covariables environnementales à échelle locale.

Les données aériennes à l'échelle locale ont toutes été collectées après 2017, c'est-à-dire le début des pics d'échouages hivernaux (Table 2). Une relative stabilité des corrélations est évidente pour le printemps et l'automne. Pour l'hiver et l'été, une stabilité ou un renforcement des corrélations sur les années récentes est notable. Ce patron suggère une stabilité des habitats potentiels des dauphins sur la période étudiée et à petite échelle.

Pour la suite de l'analyse, un focus sur les saisons hivernales et estivales est réalisé. Pour faciliter la comparaison avec la grande échelle, une différence est faite entre une zone côtière définie comme comprise entre le trait de côte et l'isobathe des 200 m ; et une zone 'offshore'

au-delà de l'isobathe des 200 m. Ces deux zones résument l'information apportée par l'inclusion des covariables 'distance' (Tableau 3). Afin de faciliter la lecture, seule les variables océanographiques sont représentées (Graphique 6 ; Huguet et al. 2023).



Graphique 6 : (A) « Boîte à moustache » des covariables océanographiques en fonction du nombre de dauphins observés par campagne aérienne et des zones côtières ou 'offshore' dans la partie centrale du golfe de Gascogne (voir Graphique 2 et Annexe 2). Les boîtes représentent 50% des valeurs, celles comprises entre le premier et troisième quartile. Les valeurs sur l'axe des abscisses sont centrées et réduites : la valeur 0 correspond à la moyenne des données à échelle locale et les graduations sont en unités d'écart-type. (B) Médiane des valeurs pour les covariables océanographiques.

Concernant la covariable 'température de surface de la mer', une association positive avec des observations de grands groupes de dauphins est suggérée dans la zone côtière en été et en hiver (en variations relatives). Cette association semble plutôt négative dans la zone offshore mais celle-ci est très restreinte au sud-ouest dans la zone d'étude à l'échelle locale. Concernant la covariable 'concentration en chlorophylle a', une association négative avec des observations de grands groupes de dauphins est suggérée dans la zone côtière en été et en hiver (en variations relatives). Cette association semble absente, voire positive dans la zone offshore.

4 Discussion

Cette analyse exploratoire concernant les variations d'habitats potentiels de dauphins (dauphin commun et dauphin bleu et blanc) s'est focalisée sur deux échelles spatiales dans le golfe de Gascogne en mobilisant les données d'observations des campagnes aériennes depuis 2012. Ce choix résulte de la disponibilité de données en hiver sur plusieurs années susceptible de mettre en évidence des changements. L'habitat potentiel est opérationnalisé par le biais de 6 covariables environnementales (Tableau 3) dont les corrélations non-linéaires avec les effectifs de dauphins sont quantifiées par saison et année aux deux échelles considérées. Cette première analyse montre des changements à large échelle entre 2012 et 2016 pour l'été, et entre 2012 et 2021 pour l'hiver. Peu de changement ou des renforcements dans les corrélations sont estimés à partir de 2019 à l'échelle locale pour l'ensemble des saisons, ce qui suggère que les changements d'habitat potentiel des dauphins seraient intervenus entre 2012 et 2016.

D'une manière générale, pour une saison donnée (hiver ou été), l'analyse exploratoire suggère des effectifs de dauphins plus importants associés à des températures de surface de la mer relativement plus élevées dans la zone côtière à large échelle et à l'échelle locale. L'inverse semble s'opérer dans la zone 'offshore' depuis 2016. Des effectifs de dauphins plus importants semblent associés à des concentrations en chlorophylle a dans l'eau relativement moins élevées en zone côtière et 'offshore' bien que cela soit moins clair à l'échelle locale étant donné la faible surface en 'offshore' (c'est-à-dire au-delà de l'isobathe des 200 m) couverte par observation aérienne.

Huguet et al. (2023) ont quantifié une hausse cumulée égale à $+0,69^{\circ}\text{C}$ entre 1999 et 2021 des eaux de surface du golfe de Gascogne situées au niveau des côtes françaises. Cette hausse correspond à 20% d'un écart-type des données utilisées dans cette étude exploratoire (pour les données de large échelle écart-type de $\text{mSST} = 3.3^{\circ}\text{C}$; pour les données à l'échelle locale écart-type de $\text{mSST} = 3.4^{\circ}\text{C}$). Huguet et al. (2023) ont également documenté une diminution moyenne de la concentration en chlorophylle a le long des côtes françaises, notamment au large des fleuves, pour tous les mois de l'année entre 1999 et 2021. Les changements d'habitat potentiel des dauphins attendus au vu des résultats de l'analyse exploratoire conduiraient à un rapprochement des animaux dans la zone côtière (entre la côte et l'isobathe des 200 m) : les associations identifiées dans l'analyse exploratoire sont cohérentes avec les changements identifiés par Huguet et al. (2023).

En conclusion, cette analyse exploratoire des variations d'habitats potentiels des dauphins dans le golfe de Gascogne est cohérente avec les changements identifiés sur des covariables structurantes du fonctionnement de l'écosystème. Néanmoins, ces covariables sont au mieux des proxy pour étudier l'habitat d'alimentation des dauphins, et ne sont probablement pas causales. En outre, les signaux décrits et ici interprétés sont faibles : les corrélations de semi-distance n'excèdent pas 0.1. Ces signaux faibles résultent possiblement de la grande mobilité des dauphins et de l'hétérogénéité temporelle et spatiale lors de la réalisation des campagnes de survols. Cette hétérogénéité, couplée à la variabilité intrinsèque de l'écosystème du golfe de Gascogne et à la grande mobilité des dauphins, complique l'identification des changements d'habitats potentiels (voir aussi Lambert et al. 2022).

L'hypothèse d'un changement sur la distribution des proies ou des comportements d'alimentation des dauphins conduisant à un rapprochement des animaux dans la zone côtière où ils sont exposés à un risque plus élevé de capture accidentelle dans des engins de pêche ne peut être exclue. L'analyse exploratoire ici réalisée est compatible avec cette hypothèse. Cette analyse suggère en outre de prolonger le travail par de la modélisation en intégrant les proies préférentielles des dauphins, et en considérant à minima dans les modèles des 'Density Surface Models' (Miller et al. 2013) des interactions statistiques entre covariables océanographiques et zones côtière/'offshore' afin de capturer les changements d'habitat potentiels en utilisant des fonctions splines bivariées (par exemple entre mSST/iso200 et mCHL/iso200 ; Pedersen et al. 2019).

5 Bibliographie

Authier, M.; Brevet, M.; Dubroca, L. (2023). Cartographier le risque de captures de cétacés à partir des données d'effort de pêche et d'observation à la mer (*pelarpp*)

Becker, E. A.; Forney, K. A.; Miller, D. L.; Barlow, J.; Rojas-Bracho, L.; Urbán R, J.; Moore, J. E. (2022) Dynamic Habitat Models Reflect Interannual Movement of Cetaceans Within the California Current Ecosystem. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 9

Geelhoed, S.; Authier, M.; Pigeault, R.; Gilles, A. (2022) Abundance and Distribution of Cetaceans. OSPAR, 2023: The 2023 Quality Status Report for the Northeast Atlantic. OSPAR Commission: London

Gilles, A.; Authier, M.; Ramirez-Martinez, N. C.; Araújo, H.; Blanchard, A.; Carlström, J.; Eira, C.; Dorémus, G.; Fernández Maldonado, C.; Geelhoed, S. C. V.; Kyhn, L.; Laran, S.; Nachtsheim, D.; Panigada, S.; Pigeault, R.; Sequeira, M.; Sveegaard, S.; Taylor, N. L.; Owen, K.; Saavedra, C.; Vázquez-Bonales, J. A.; Unger, B.; Hammond, P. S. (2023) Estimates of Cetacean Abundance in European Atlantic Waters in Summer 2022 from the SCANS-IV Aerial and Shipboard Surveys. Version of 2023-09. Institute for Terrestrial and Aquatic Wildlife Research, University of Veterinary Medicine Hannover, Foundation, Büsum, Germany.

Huguet, A.; Petitgas, P.; Dorand, M.; Ozanam, B. (2023). Indices environnementaux et tableau de bord de leurs déviations rapport à la climatologie, 2000-2020. (L211).

Lambert, C.; Authier, M.; Blanchard, A.; Dorémus, G.; Laran, S.; Van Canneyt, O.; Spitz, J. (2022) Delayed Response to Environmental Conditions and Infra-seasonal Dynamics of the Short-Beaked Common Dolphin Distribution. *Royal Society Open Science*, Vol. 9, p. 220379

Laran, S.; Authier, M.; Blanck, A.; Dorémus, G.; Falchetto, H.; Monestiez, P.; Pettex, E.; Stefan, É.; Van Canneyt, O.; Ridoux, V. (2017) Seasonal Distribution and Abundance of Cetaceans within French Waters-Part II: the Bay of Biscay and the English Channel. *Deep Sea Research Part II*, Vol. 141, p. 31-40

Laran, S.; Genu, M.; Authier, M.; Blanchard, A.; Dorémus, G.; Sanchez, T.; Spitz, J.; Van Canneyt, O. (2022a) Distribution et abondance de la mégafaune marine en France métropolitaine. Rapport final de la campagne SAMM II Atlantique-Manche - Hiver 2021 de l'Observatoire Pelagis (UAR 3462, La Rochelle Université / CNRS) pour la Direction de l'Eau et de la Biodiversité et L'Office Français de la Biodiversité. 72 pp.

Laran, S.; Blanchard, A.; Genu, M.; Sanchez, T.; Dorémus, G.; Van Canneyt, O.; Spitz, J. (2022b) Suivi de la mégafaune marine au large des Pertuis charentais, de l'Estuaire de la Gironde et de Rochebonne par observation aérienne, Campagne SPEE 2019-2022, rapport final de l'Observatoire Pelagis (UAR 3462, La Rochelle Université; CNRS) & Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (Office Français de la Biodiversité)

Miller, D. L.; Burt, M. L.; Rexstad, E. A.; Thomas, L. (2013) Spatial Models for Distance Sampling Data: Recent Developments and Future Directions. *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 4, p. 1001-1010

Pebesma, E., & Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With Applications in R*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>

Pedersen, E. J.; Miller, D. L.; Simpson, G. V.; Ross, N. (2019) Hierarchical Generalized Additive Models in Ecology: an Introduction with mgcv. *PeerJ*, Vol. 7, p. e6876

Petitgas, P.; Doray, M.; Huret, M.; Massé, J.; Woillez, M. (2014) Modelling the Variability in Fish Spatial Distributions over Time with Empirical Orthogonal Functions: Anchovy in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 71, No. 9, p. 2379-2389

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Roberts, J. J.; Best B. D.; Dunn D. C.; Tremblay, E. A.; Halpin P. N.; (2010) Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. *Environmental Modelling & Software*, 25: 1197-1207

Van Canneyt, O.; Blanchard, A.; Laran, S.; Dorémus, G.; Genu, M.; Sanchez, T.; Spitz, J. (2024) Rapport de campagne CAPECET II (campagne d'observation aérienne de la mégafaune marine). Rapport de campagne. Observatoire Pelagis (UAR 3462, La Rochelle Université / CNRS). 41 p. (L131).

Wickham, H.; Averick, M.; Bryan, J.; Chang, W.; McGowan, L. D.; François, R.; Grolemund, G.; Hayes, A.; Henry, L.; Hester, J.; Kuhn, M.; Pedersen, T. L.; Miller, E.; Bache, S. M.; Müller, K.; Ooms, J.; Robinson, D.; Seidel, D. P.; Spinu, V.; Takahashi, K.; Vaughan, D.; Wilke, C.; Woo, K.; Yutani, H. (2019) Welcome to the *tidyverse*. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. doi:10.21105/joss.01686

Woillez, M.; Poulard J-C.; Rivoirard J.; Petitgas, P.; Bez, N. (2007) Indices for Capturing Spatial Patterns and their Evolution in Time, with Application to European Hake (*Merluccius merluccius*) in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 64, No. 3, p. 537-550

Zhong, W.; Li, Z.; Guo, W.; Cui, H. (2023) Semi-Distance Correlation and its Applications. *Journal of the American Statistical Association*.

6 Annexes

Annexe 1 : Cartographie lissée du nombre de dauphins (par unité d'effort de prospection en km) dénombrés lors des campagnes aériennes à large échelle. Le cercle en pointillé représente le plus petit cercle centré sur le centre de gravité des données et dont la surface est égale à l'inertie. Le rayon de ce cercle est plus élevé en hiver 2021 par rapport à l'hiver 2012, montrant une plus grande dispersion des dauphins.

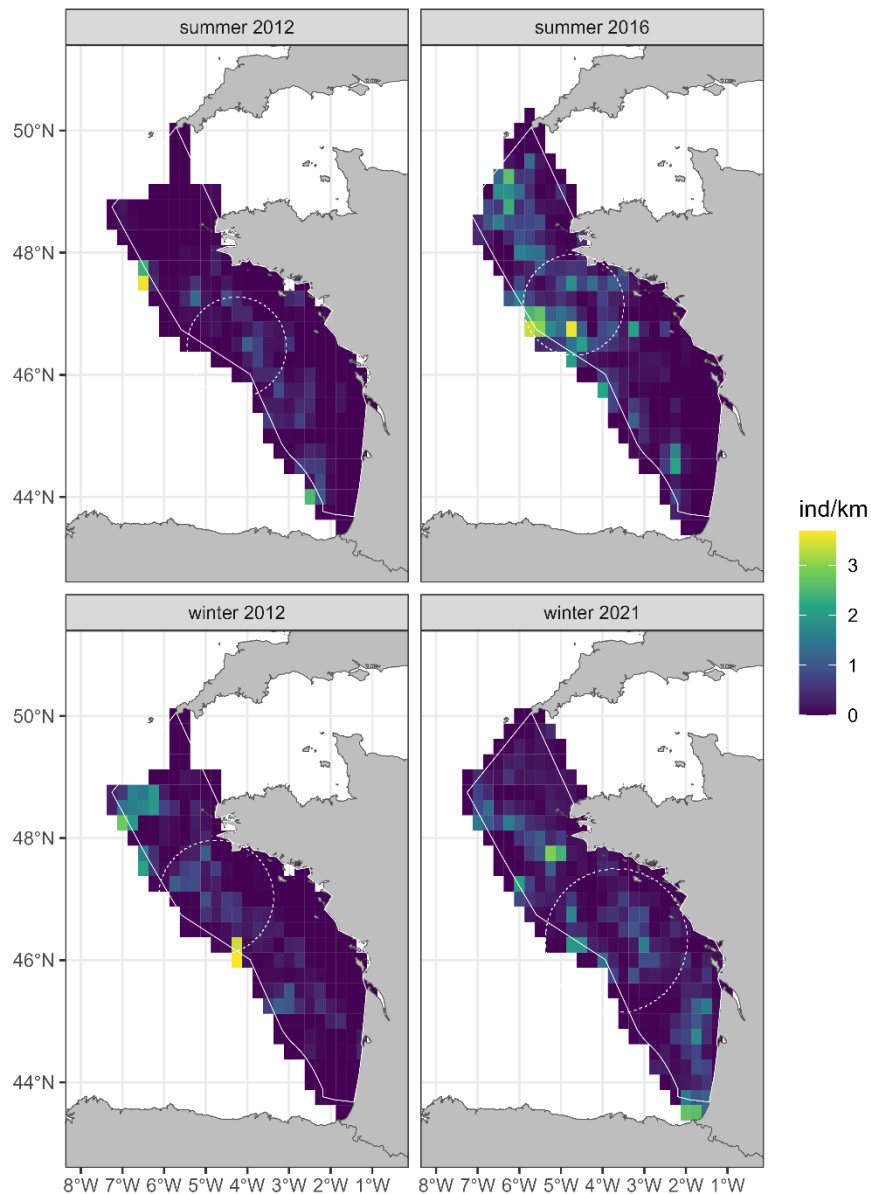


Tableau : Centre de Gravité et inertie des données à large échelle. Le rayon correspond au plus petit cercle centré sur le centre de gravité dont la surface est égale à l'inertie.

Saison	Année	Centre de gravité		Inertie	
		Longitude	Latitude	Surface (km ²)	Rayon (km)
Hiver	2012	-4.749456	47.02457	33 763	104
Hiver	2021	-3.670612	46.31887	53 010	130
Eté	2012	-4.257526	46.45185	25 912	91
Eté	2016	-4.696534	47.14571	25 953	91

Variations d'habitats potentiels des dauphins (dauphin commun et dauphin bleu et blanc) : une analyse exploratoire

Annexe 2 : Cartographie lissée du nombre de dauphins (par unité d'effort de prospection en km) dénombrés lors des campagnes aériennes à échelle locale. Le cercle en pointillé représente le plus petit cercle centré sur le centre de gravité des données et dont la surface est égale à l'inertie.

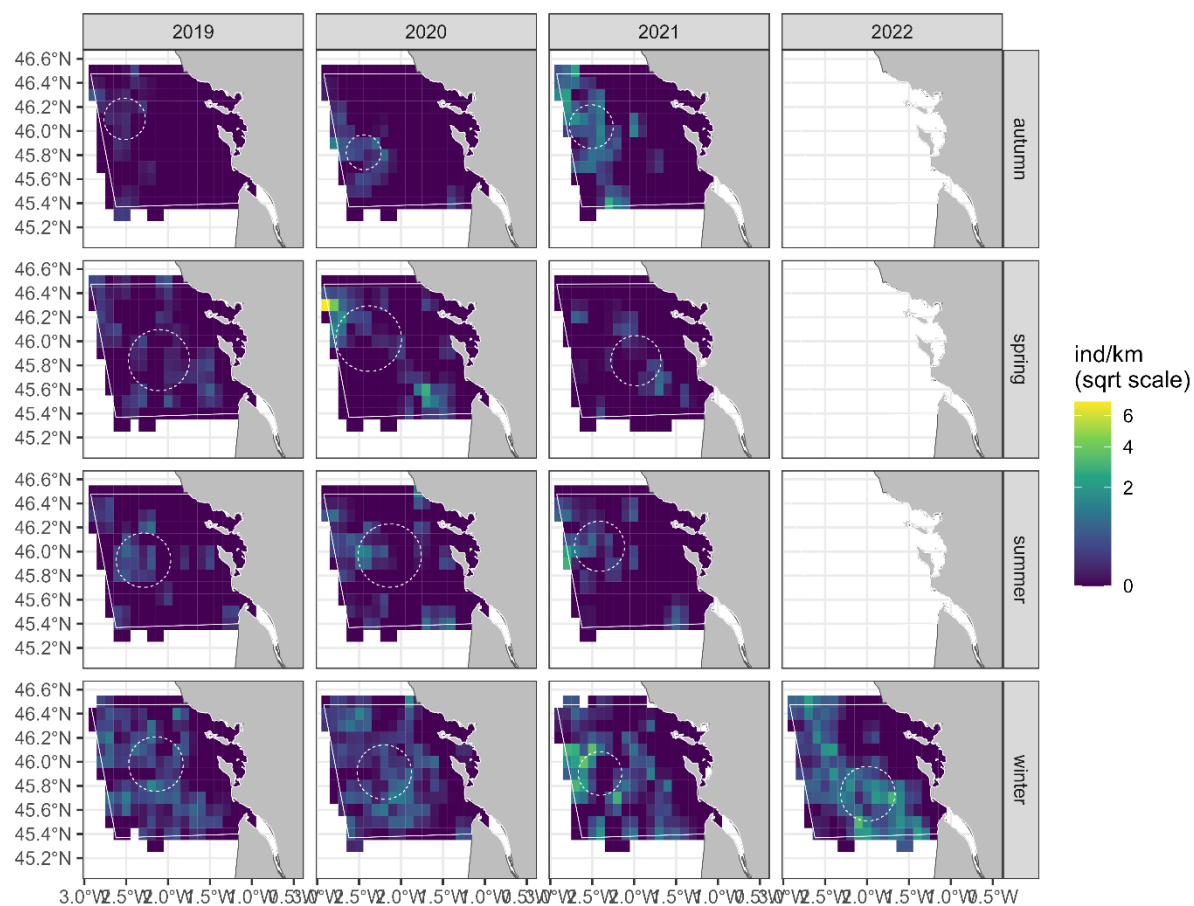


Tableau : Centre de gravité et inertie des données à échelle locale. Le rayon correspond au plus petit cercle centré sur le centre de gravité dont la surface est égale à l'inertie.

Saison	Année	Centre de gravité		Inertie	
		Longitude	Latitude	Surface (km ²)	Rayon (km)
Hiver	2019	-2.108387	45.84280	1983	25
Hiver	2020	-2.145007	45.98150	1999	25
Hiver	2021	-2.199944	45.91368	1304	20
Hiver	2022	-2.406087	45.90309	2006	25
Automne	2019	-2.518459	46.10080	1105	19
Automne	2020	-2.445581	45.82347	819	16
Automne	2021	-2.509964	46.03697	1701	23
Eté	2019	-2.293216	45.92818	1945	25
Eté	2020	-2.135431	45.96674	2622	29
Eté	2021	-2.412681	46.04395	1701	23
Printemps	2019	-2.108387	45.84280	2401	28
Printemps	2020	-2.386550	46.02126	2838	30
Printemps	2021	-1.977507	45.83884	1693	23

Annexe 3 : Corrélation de semi-distance entre covariables environnementales et nombre de dauphins observés lors des campagnes aériennes à large échelle

Saison	Année	semi-distance		
		corrélation	statistique test	valeur p
Hiver	2012	0.035	36.5	0.001
	2021	0.010	7.5	0.001
Eté	2012	0.016	13.9	0.001
	2016	0.043	47.8	0.001

Annexe 4 : Corrélation de semi-distance entre covariables environnementales et nombre de dauphins observés lors des campagnes aériennes à échelle locale

Saison	Année	semi-distance		
		corrélation	statistique test	valeur p
Hiver	2019	0.053	24.7	0.001
	2020	0.044	21.1	0.001
	2021	0.065	17.7	0.002
	2022	0.088	67.0	0.001
Automne	2019	0.031	14.6	0.002
	2020	0.052	26.7	0.001
	2021	0.113	47.9	0.001
Eté	2019	0.022	7.4	0.011
	2020	0.036	22.6	0.001
	2021	0.031	9.8	0.007
Printemps	2019	0.017	4.7	0.049
	2020	0.019	5.8	0.056
	2021	0.013	1.3	0.234