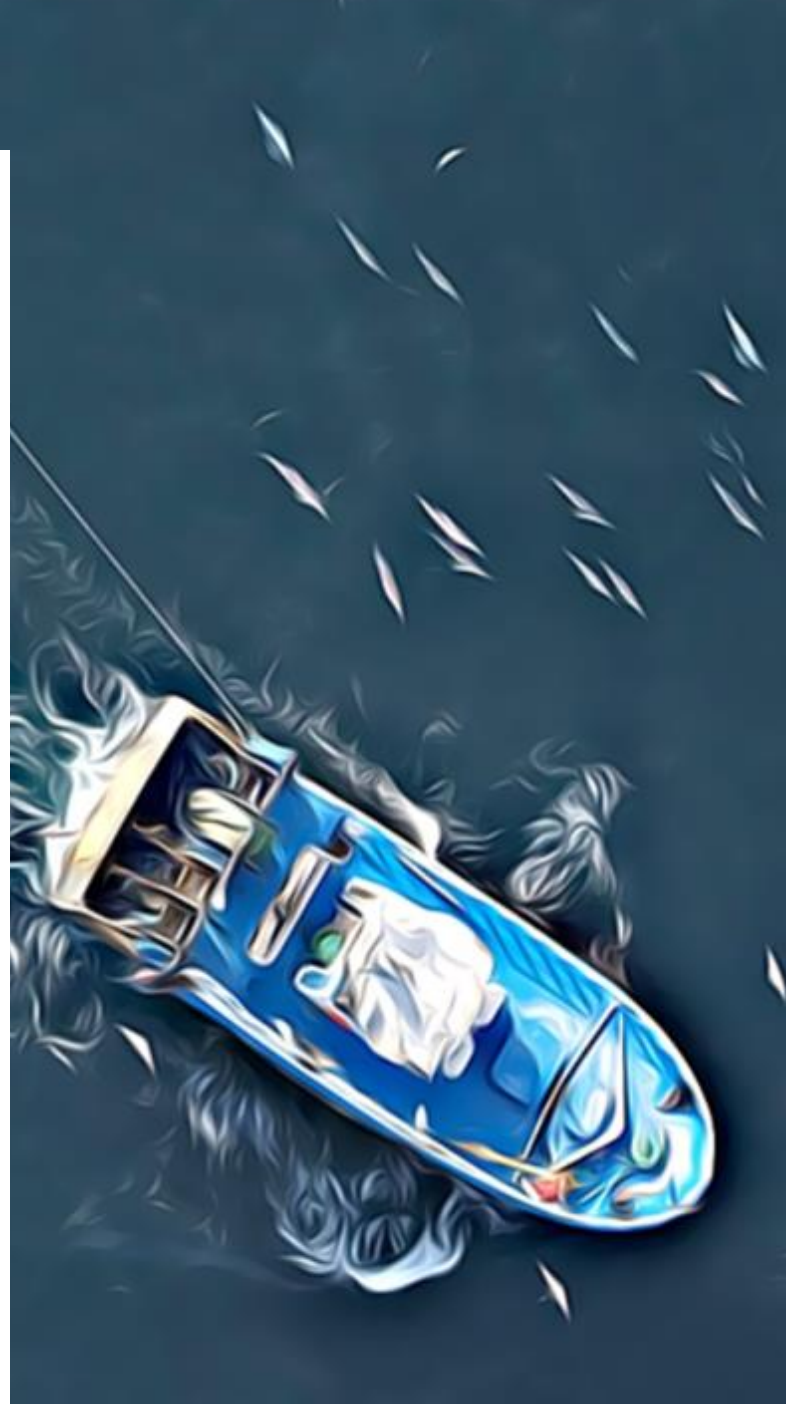




DELphinus MOuvements GESTion

Distribution des petits delphininés en hiver : une distribution plus côtière ?





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 : WP1

Responsables du WP : Tiphaine Chouvelon (Observatoire Pelagis), Amélia Viricel (UBO)

Livrable L.1.31 b

Date de production : Juillet 2024

Titre : Distribution des petits delphininés en hiver : une distribution plus côtière ?

Auteurs : Genu Mathieu (La Rochelle Université), Authier Matthieu (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, La Rochelle Université-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 constitue une mise à jour des précédentes analyses effectuées sur la campagne de survols CAPECET. Un cycle supplémentaire de survol a été effectué durant l'hiver 2024 composé de 4 sessions de survols s'étalant de janvier à mars. Cette période est particulière car elle coïncide avec la période de fermeture de la pêche imposée du 22 janvier au 20 février 2024. L'analyse de ces derniers survols se fait conjointement avec les précédents cycles de 2020 et 2023 en faisant un focus sur les petits delphininés. L'accent a été mis sur l'analyse la distribution spatiale des petits delphininés en réalisant dans un premier temps une simple analyse descriptive puis une modélisation spatiale par krigeage au niveau de la zone d'étude. Les résultats du krigeage, en termes d'abondance estimée, sont comparés à l'approche traditionnelle (« Conventional Distance Sampling ») pour validation. Les cartes de krigeage révèlent une abondance plutôt côtière avec toutefois des variations inter-annuelles marquées.

Dissémination

Type de livrable : rapport

Public : Oui

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

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

wwwz.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 Elevages Marins (CNP MEM)
134 avenue de Malakoff
75116 Paris

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

Table des matières

1	Contexte	5
1.1	Contexte environnemental et scientifique.....	5
1.2	Rôle du livrable	5
1.3	Acronymes et abréviations	5
2	Description de la structure spatiale	6
3	Modélisation spatiale	8
3.1	Description de la méthode	8
3.2	Résultats	10
3.3	Comparaison avec les estimations CDS.....	11
3.4	Centre de gravité	12
4	Lien avec les échouages	13
5	Conclusion	16
6	Bibliographie	17
7	Annexes	18

1 Contexte

1.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET SCIENTIFIQUE

Le précédent livrable traitant de la campagne de survols CAPECET (Rapport de campagne CAPECET II, L 1.3.1 Van Canneyt et al. 2024) faisait un état des lieux des deux cycles de survols ayant eu lieu pendant les hivers 2020 et 2023. Celui-ci traitait des différents groupes taxonomiques qui ont pu être observés lors de ces survols en dressant une analyse descriptive spatiale à l'aide des taux de rencontre et également une étape de modélisation spatiale en utilisant le krigeage pour établir des cartes de prédictions de densité sur la zone d'étude.

Un nouveau cycle de survols a eu lieu durant l'hiver 2024 dans le cadre de la campagne CAPECET du projet DELMOGES.

1.2 ROLE DU LIVRABLE

Ce rapport rapporte une analyse de l'ensemble des données CAPECET collectées à ce jour. Il traitera exclusivement des petits delphininés (dauphin commun et dauphin bleu et blanc) en utilisant les données de survols aériens de la campagne CAPECET (hivers 2020, 2023 et 2024). Un focus sera fait sur les cartes de prédictions de densité celles-ci en lien avec les événements d'échouages ayant eu lieu proches des côtes où les survols ont eu lieu.

1.3 ACRONYMES ET ABREVIATIONS

CDS	Conventional Distance Sampling
GP	Gaussian Process

2 Description de la structure spatiale

Longtemps évaluée lors d'une unique saison, l'été, la connaissance des mouvements intra-annuels du dauphin commun était jusqu'à présent peu documentée. Des relevés aériens plus récents ont mis en évidence des changements inter-saisonniers de la distribution, et suggéré également des changements intra-saisonniers. Lors de l'hiver 2020, des survols effectués dans le cadre du programme CAPECET (financement DEB) ont ainsi montré pour la première fois la capacité des dauphins à se concentrer temporairement dans certaines zones illustrant une forte variabilité intrahivernale de leur distribution. Des campagnes de survols pendant les hivers 2023 et 2024 ont permis de renforcer le jeu de données d'observations en mer pendant la saison hivernale (rapport de campagne CAPECET II, L 1.3.1). Le calendrier de l'ensemble des survols CAPECET est représenté graphiquement sur la Figure 1.

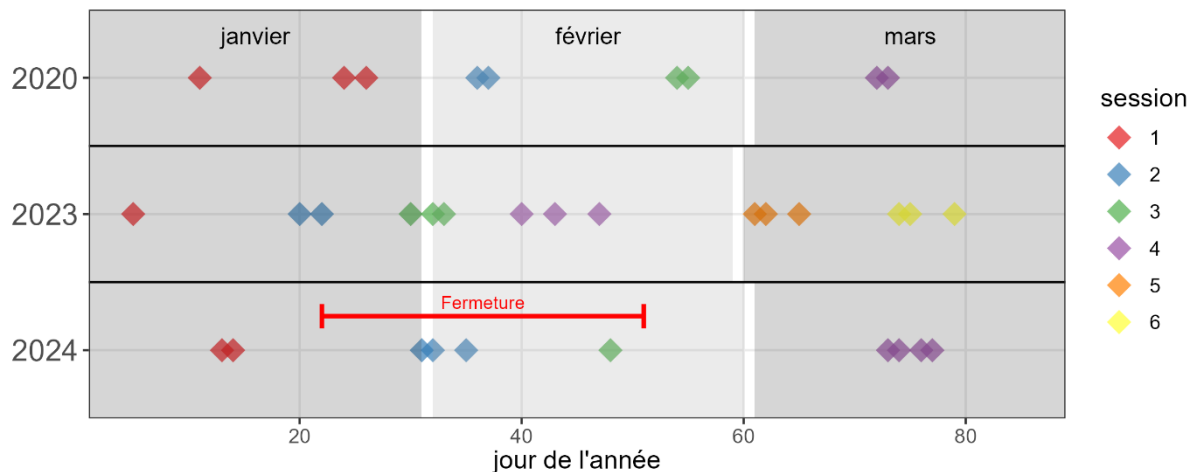


Figure 1: distribution temporelle des sessions CAPECET pour les 3 cycles (sur l'axe des abscisses, 20 = 20 janvier, ... Le segment rouge correspond à l'arrêt de fermeture de la pêche dans le golfe de Gascogne ayant eu lieu du 22 janvier 2024 au 20 février 2024)

Les sessions de survols n'ont pas eu lieu aux mêmes dates d'une année sur l'autre. Les années 2020 et 2024 ont des répartitions des sessions relativement similaires, avec la session 1 ayant eu lieu en janvier, les sessions 2 et 3 en février et la session 4 en mars. Tandis que pour l'année 2023, il y a eu 6 sessions de survols et les sessions sont en décalage avec celles de 2020 et 2024, bien que couvrant l'hiver (Figure 1).

Il faudra garder en mémoire cette hétérogénéité temporelle lors de l'analyse des graphiques qui suivront, étant donné que les sessions seront présentées conjointement mais possèdent donc un décalage dans le temps.

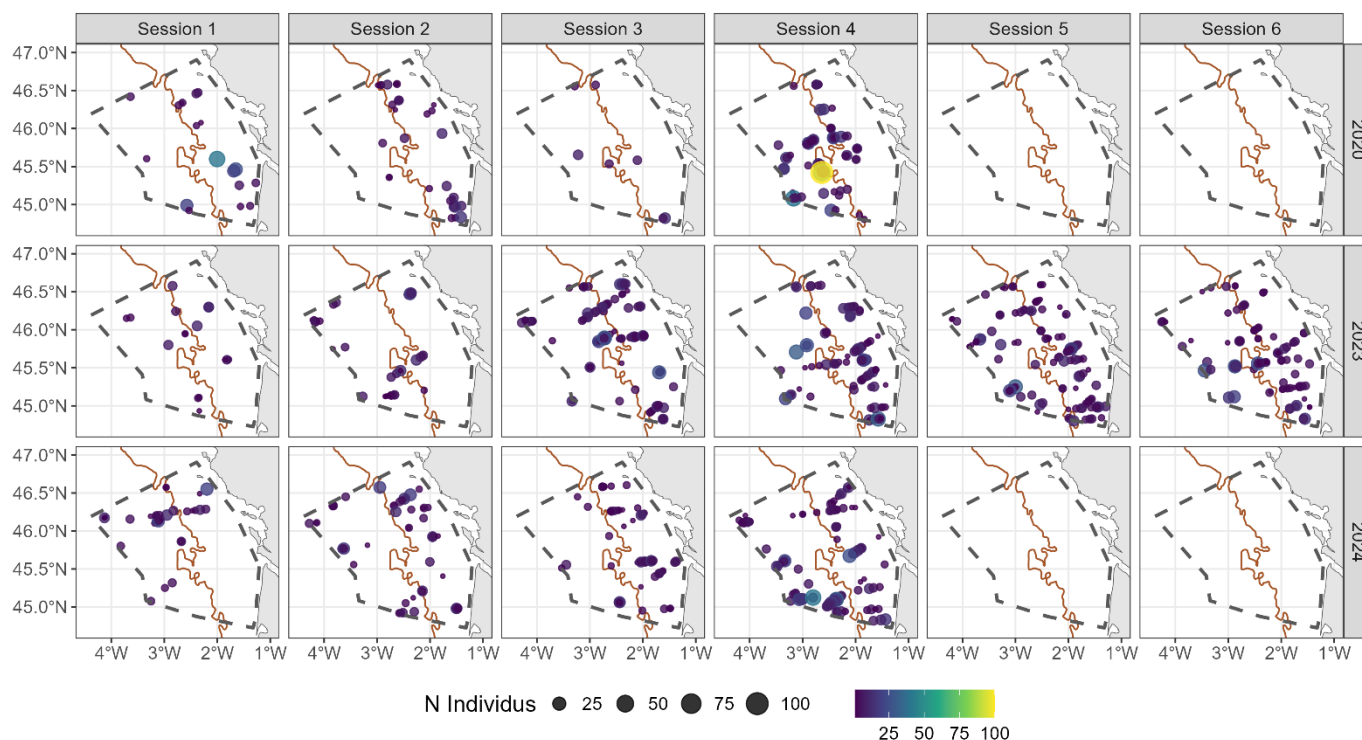


Figure 2 : Distribution des observations de petits delphininés par session des 3 années de campagnes CAPECET. (L'effort d'échantillonnage est proposé sur une autre figure disponible en annexe 1 pour éviter de surcharger la figure).

La distribution spatiale des petits delphininés semble plus côtière pour les années 2023 et 2024 comparé à 2020, même si ce n'est pas le cas pour l'ensemble des sessions (Figure 2). De plus, pour les 3 années de survols, il semblerait que le maximum d'observation soit observé lors de la session 4 (qui ont eu lieu au mois de mars pour 2020 et 2024, et en février pour 2023 ; cf. Figure 1).

Les observations ont été groupées selon leur appartenance à la zone côtière ou la zone du large en séparant ces deux zones par l'isobathe 100 mètres. Un taux de rencontre a été calculé en sommant le nombre total d'observations de petits delphininés par année, session et zone (côte/large) et en le divisant par l'effort total en kilomètres par année, session et zone (Figure 3). Pour les 3 années, la session 4 présente un taux de rencontre très différent entre la zone côtière et celle du large. Pour 2020 et 2024 (session 4 en mars), le taux de rencontre est le plus élevé pour le large, tandis qu'en 2023 (session 4 en février) le taux de rencontre est le plus élevé pour la zone côtière. Pour les sessions 2 et 3, pour les années 2020 et 2024, le taux de rencontre est plus élevé sur la côte comparativement à celui au large. Ce patron est donc inversé pour la session 4. Pour 2023, le taux de rencontre est plus élevé sur la côte comparativement à celui au large pour toutes les sessions sauf la session 2 (Figure 3).

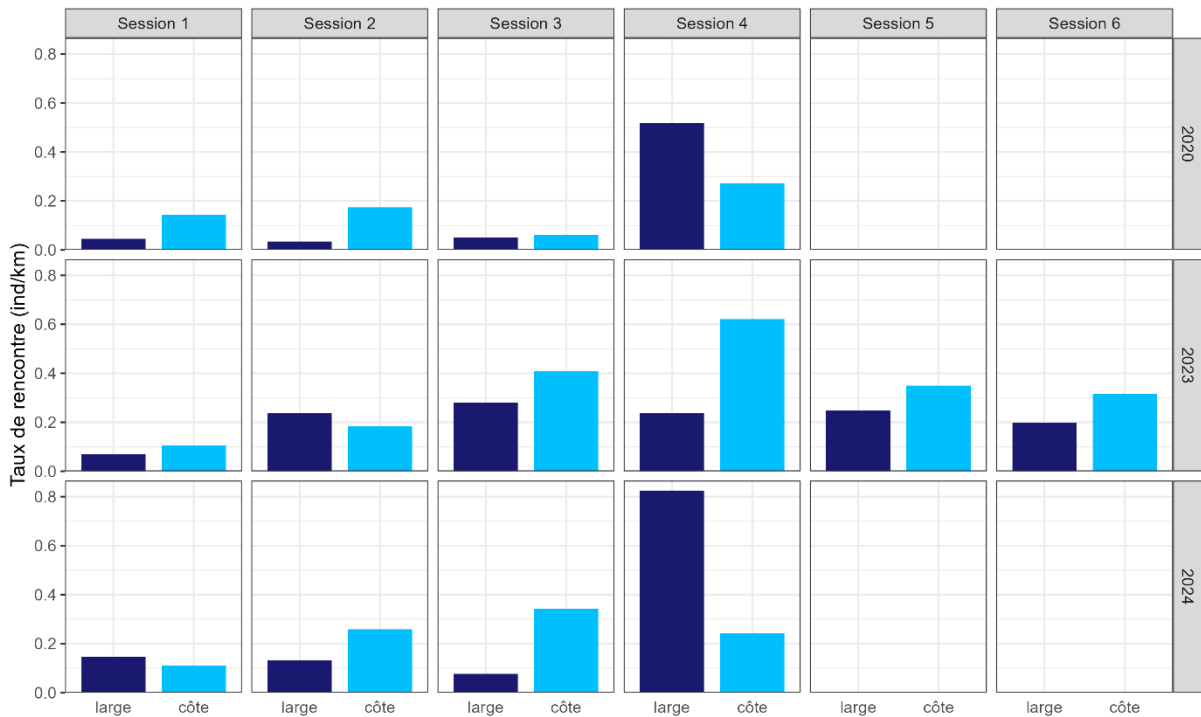


Figure 3 : Taux de rencontre des petits delphininés (individus/km) selon leur distribution au large ou côtière par session et pour les 3 années CAPECET

3 Modélisation spatiale

3.1 DESCRIPTION DE LA METHODE

Un traitement géostatistique a été réalisé afin d'obtenir des cartes pour chacune des sessions des années 2020, 2023 et 2024. Le modèle de géostatistique suppose une vraisemblance bêta-négative-binomiale afin de tenir compte de la forte sur-dispersion dans les données, notamment en termes de tailles des groupes d'individus (voir Figure 2 : des groupes de 1 à 100 individus sont détectés sur la zone d'étude). Le modèle utilisé tient compte :

1. de la détection imparfaite en intégrant une fonction de détection demi-normale dépendante de l'état de la mer (échelle Beaufort) ;
2. de l'autocorrélation spatiale au sein d'une session (modélisée par un processus gaussien, ou *Gaussian process* (GP); Wilke 2003) ; et
3. d'une corrélation temporelle entre sessions au sein d'une même année, grâce à l'inclusion d'un processus autorégressif d'ordre 1.

L'analyse suppose que les patrons interannuels peuvent être différents et considère donc les données entre années différentes comme indépendantes. Les prédictions sont réalisées sur une grille régulière de 25 km² (5 km x 5 km) couvrant la zone d'étude.

Le modèle utilisé (Figure 4) a été codé en utilisant le langage de programmation probabiliste *Stan* (Carpenter et al. 2017). Le code est disponible dans l'annexe 2. L'ajustement du modèle

et l'estimation des paramètres ont été réalisés avec un algorithme de Monte Carlo Halmitonien (Carpenter et al. 2017) : cinq chaînes de Markov ont été initialisées pour échantillonner 11000 valeurs de la distribution *a posteriori* des paramètres du modèles. Les 1000 premières valeurs ont été écartées (phase d'échauffement et de tuning de l'algorithme). Les calculs ont été lancés sur le cluster Curta du Mésocentre de Calcul Intensif Aquitain.

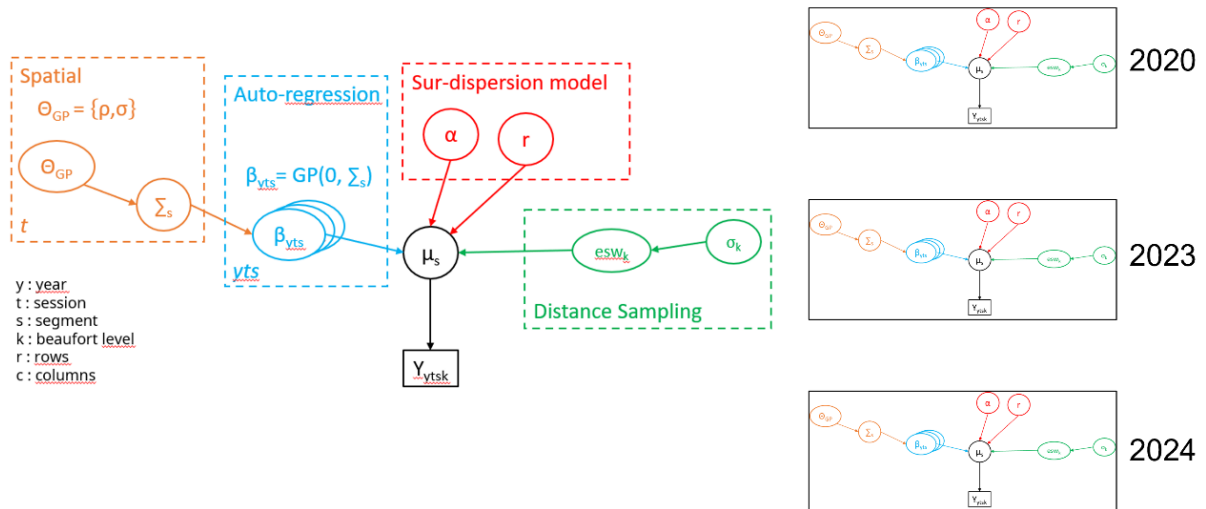


Figure 4 : Représentation des étapes de modélisation du modèle de krigeage par processus gaussien intégrant une dynamique d'auto-régression temporelle entre les sessions au sein d'une année et un modèle de sur-dispersion des comptages

3.2 RESULTATS

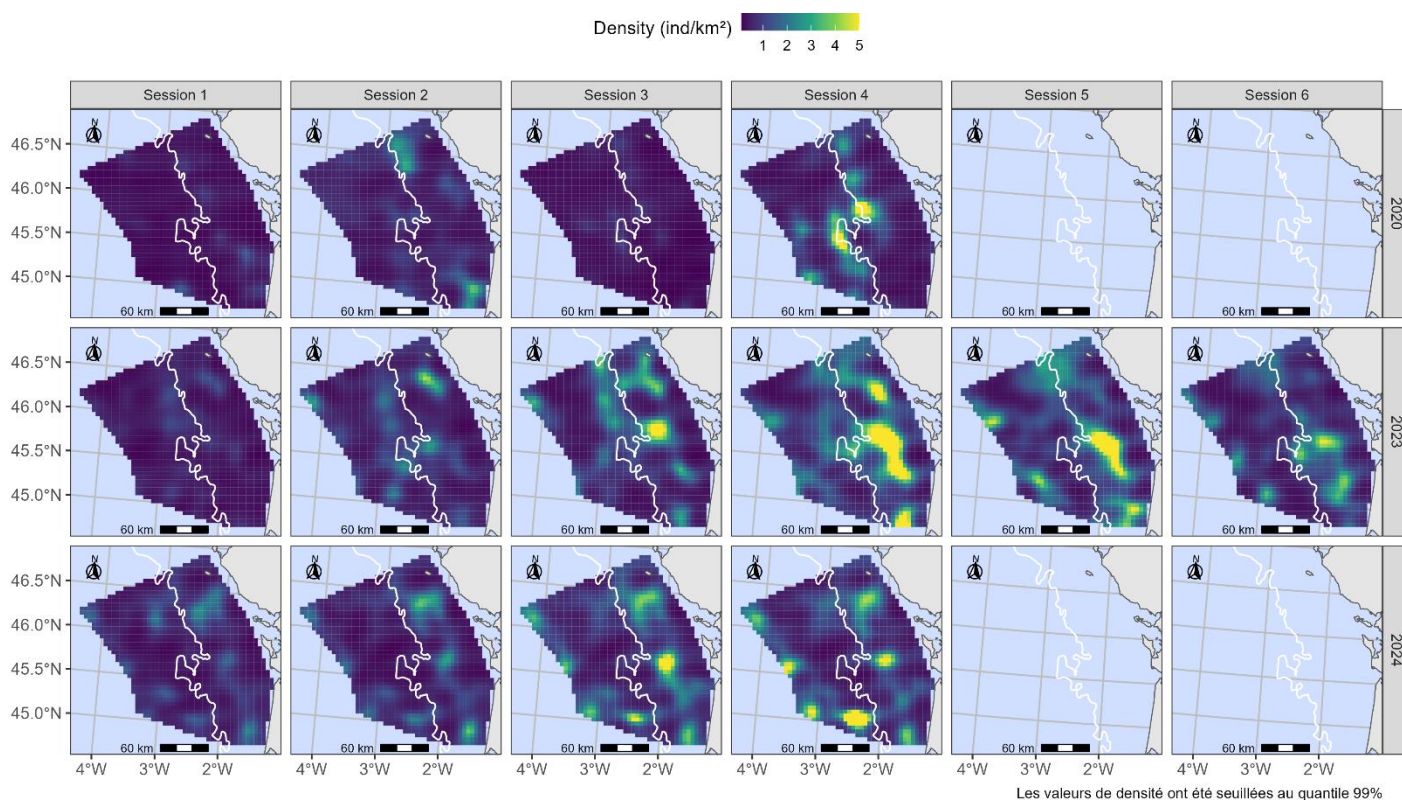


Figure 5 : Carte de prédiction des densités estimées par krigeage dans la zone CAPECET pour chaque session des 3 cycles de campagne de survols aériens

Le modèle de krigeage (Figure 5) traduit de manière fidèle les hotspots de distribution des petits delphininés (Figure 2) tout en réalisant une interpolation. Les tendances inter-annuelles et inter-sessions sont respectées par rapport aux observations (Figure 3). Pour les trois années, les petits delphininés apparaissent proches des côtes (entre la côte et l'isobathe des 100 m) en début d'hiver (i.e. les deux ou trois premières sessions), puis des différences inter-annuelles apparaissent. Durant l'ensemble de l'hiver 2023, les densités les plus élevées dans la zone d'étude restent concentrées dans cette bande côtière. En 2024, en mars (session 4), les densités les plus élevées sont au-delà de l'isobathe des 100 m, plus au sud de la zone d'étude, soulignant ainsi une certaine variabilité inter-annuelle. Ces variations sont aussi résumées par le paramètre d'autocorrélation temporelle du modèle de krigeage : ce paramètre, compris entre 0 et 1, quantifie la « viscosité » de la distribution (c'est-à-dire la ressemblance, avec 0 aucune ressemblance et 1 ressemblance totale) entre deux sessions consécutives. Il est de 0.35, 0.55 et 0.72 en 2020, 2023 et 2024 respectivement. Ces changements dans la valeur du paramètre d'autocorrélation temporelle suggèrent une plus forte ressemblance entre les cartes au sein d'une année, c'est-à-dire une stabilité dans la distribution estimée au sein d'une année.

3.3 COMPARAISON AVEC LES ESTIMATIONS CDS

Pour juger de la validité du modèle géostatistique, une comparaison a été faite avec les estimations de densité obtenues avec la méthode du distance sampling (CDS). Pour cela les estimations de densité obtenues par krigeage ont été agrégées non plus à l'échelle de la cellule de la grille de prédiction mais à l'échelle de la zone CAPECET de 35 183 km². Au cours de cette agrégation, la moyenne, ainsi que les quantiles à 10% et 90% sont calculés (correspondant donc à un intervalle de confiance à 80%).

Les valeurs de densité prédites par krigeage et par CDS sont très proches en moyenne. Les tendances de variations pour les 3 années sont également les mêmes pour les deux méthodes (Figure 6).

L'incertitude autour des valeurs de densité estimées par krigeage est beaucoup plus élevée que pour la méthode CDS. Cela provient, entre autres, de la loi beta négative binomiale de la loi de vraisemblance, qui permet d'accommoder la dispersion élevée des valeurs que peuvent prendre les données. Cette dispersion est lissée dans le cas des estimations par CDS du fait de l'utilisation d'une moyenne globale sur la zone d'étude. Le krigeage permet quant-à-lui de conserver les variations spatiales de densité des animaux au sein de la zone d'étude. En outre, le modèle est complexe et comporte de nombreux paramètres à estimer : le rapport paramètres à estimer *versus* données est donc plus élevé, et les incertitudes autour de ces paramètres sont donc plus élevées que dans le cas du CDS. Néanmoins, les deux approches fournissent des estimations moyennes qui restent comparables et du même ordre de grandeur, en notant toutefois une tendance à une estimation plus élevée avec l'approche par krigeage (Figure 6).

Sur les années 2023 et 2024, les densités les plus fortes dans la zone CAPECET sont estimées à partir du mois de février et perdurent en mars (Figure 6). Au vu de la distribution côtière des petits delphininés, toute activité de pêche impliquant des engins à risque entre la côte et l'isobathe des 100 mètres pourrait ainsi occasionner des captures accidentelles.

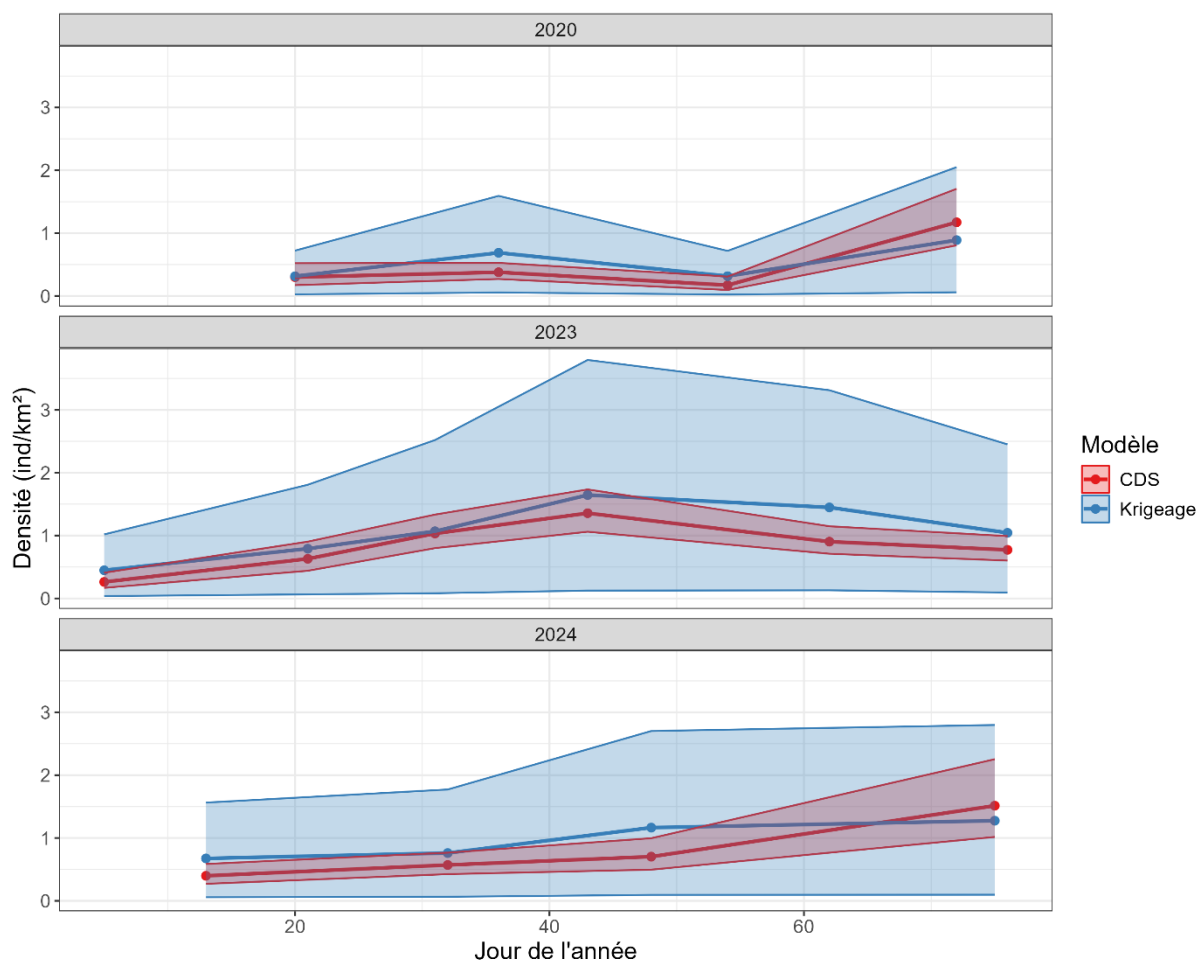


Figure 6: Comparaison des densités prédites par Conventional Distance Sampling (CDS, en rouge) et par krigeage par Processus Gaussien (en bleu), pour chaque session des 3 années CAPECET. Les bandes plus claires correspondent aux intervalles de confiance bornés à 10% et 90%

3.4 CENTRE DE GRAVITE

Afin de résumer la distribution des prédictions des petits delphinés, le centre de gravité de celle-ci a été calculé pour chaque couple année/session (Figure 4). Le centre de gravité est obtenu en faisant une moyenne des positions spatiales des cellules de prédiction pondérée par les valeurs de densité au sein de ces cellules.

A l'échelle de la zone d'étude, le centre de gravité de la distribution des petits delphinés est au niveau de l'isobathe des 100 m (Figure 4). L'évolution temporelle du centre de gravité de la densité prédite est plutôt constante. Que ce soit à échelle inter-saisonnière ou interannuelle, le centre de gravité reste à l'intérieur d'une zone d'environ 14 km de rayon (Figure 7).

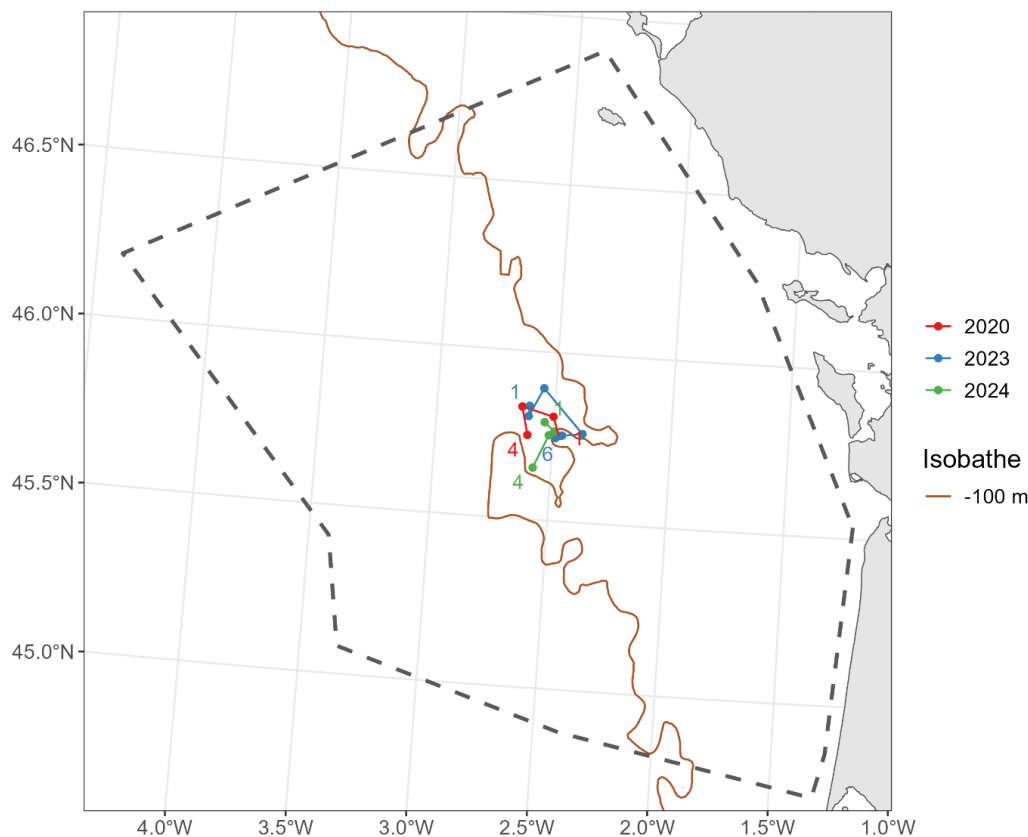


Figure 7 : Évolution de la distribution du centre de gravité des petits delphininés pour chaque session des 3 cycles CAPECET. (La première et la dernière session de chaque cycle est numérotée. Les sessions sont reliées selon leur ordre chronologique)

Cet indicateur ne permet pas de discriminer l'hétérogénéité de la distribution spatiale des petits delphininés, il constitue seulement un indicateur de distribution global sur la zone d'étude ; il convient donc pour une population homogène constituée d'un seul patch. Cependant, pour un sujet d'étude très mobile disposé en plusieurs patches, il est nécessaire d'utiliser des indicateurs permettant de discerner des variations à plus fine échelle spatiale.

4 Lien avec les échouages

Les années 2020, 2023 et 2024 font partie des années pour lesquelles le nombre d'échouages recensés en hiver est le plus élevé jamais enregistré en France métropolitaine. En effet, l'hiver comptant le plus d'échouages est l'hiver 2023 avec 1482 petits cétacés recensés sur le littoral atlantique de janvier à avril. L'hiver 2020 arrive 3^{ème} (1021 échouages¹) et celui de 2024 4^{ème} (962 échouages, bilan provisoire au 30/04/2024) (bulletin n°8 DGAMPA). Les campagnes de survols CAPECET permettent de mettre en relation la distribution des petits delphininés avec les nombres d'échouages ayant eu lieu sur les périodes correspondantes. Même si la zone

¹ Recensement de janvier à mi-mars dû à la crise sanitaire

CAPECET couvre seulement une fraction du domaine maritime métropolitain français, il est intéressant de chercher à mettre en relation les tendances de distribution avec les échouages recensés.

Il a été montré précédemment que la distribution en 2023 semblait plus côtière pour la session 4 comparé aux deux autres années de survol CAPECET (2020 et 2024). Et ceci intervient l'année où le nombre d'échouages de petits cétacés est le plus élevé jamais enregistré en France métropolitaine. Même si un grand nombre de facteurs sont à prendre en compte pour pouvoir expliquer les événements d'échouages, celui de l'hiver 2023 pourrait ainsi être lié à la distribution plus côtière des petits delphininés.

En plus de la distribution des petits delphininés et de l'effort de pêche des engins à risque, la direction du vent conditionne fortement la probabilité d'échouage d'un cadavre en mer sur le continent. Pour mettre en lien la distribution des petits delphininés dans la zone CAPECET avec les conditions de vent dans cette zone, il est proposé d'analyser les conditions de vent au niveau de la station météorologique de Chassiron (île d'Oléron 17) pour les hivers 2020, 2023 et 2024 (Figure 8). Pour l'année 2020, les vents étaient en direction de la côte de février à mi-mars et de façon ponctuelle la première moitié de janvier. En 2023, les vents étaient d'ouest la première moitié de janvier et en mars et enfin en 2024, les vents étaient d'ouest en février et de façon ponctuelle en mars. Il est possible de mettre en évidence un lien entre le nombre d'échouages et la direction des vents pour les 3 années 2020, 2023 et 2024. En effet, en 2020 les échouages ont essentiellement eu lieu en février et début mars, période pour laquelle la station de Chassiron enregistre majoritairement des vents d'ouest. Ensuite, pour l'année 2023, un premier pic d'échouages a eu lieu début janvier, puis un second en mars, correspondant aux moments où des vents d'ouest sont enregistrés à la station météo de Chassiron. Enfin, l'année 2024 est un peu particulière avec la période de fermeture de la pêche du 22 janvier au 20 février (correspondant à la session 2 des survols CAPECET de 2024), mais on observe après la fin de la fermeture (fin février, début mars), un léger pic d'échouages correspondant à des enregistrements de vents d'ouest à cette période (Figure 8).

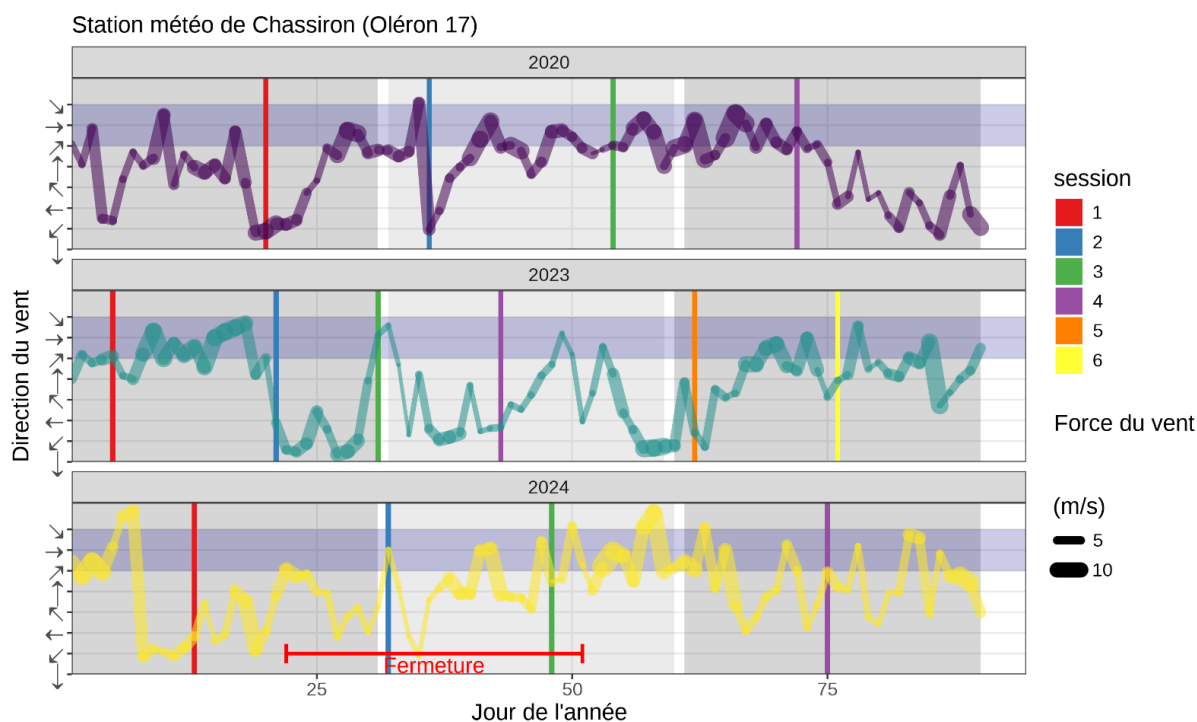


Figure 8 : Évolution de la direction du vent pour 2020, 2023 et 2024 au niveau de la station météorologique de Chassiron (île d'Oléron). La largeur de la ligne de la courbe est proportionnelle à la force du vent. La bande bleue en haut de chaque sous-graphique correspond à une direction des vents favorable à une dérive vers le continent (Source : Météo-France).

Cette analyse reste localisé à la zone CAPECET. Il serait intéressant de faire ce même genre de prédiction de densité sur une zone semblable à celle de CAPECET mais à différentes locations, comme par exemple au large du Morbihan ou de la Vendée afin de conforter ou réfuter les observations faites dans la zone CAPECET et éventuellement déceler des particularités locales.

Parmi les autres facteurs expliquant les échouages de mammifères marins dus aux captures accidentelles, les conditions météorologiques, les courants marins et l'effort de pêche sont aussi à prendre en compte. Il serait intéressant d'effectuer une étude complète afin de mettre en évidence l'interaction de tous ces facteurs, comprendre leurs implications respectives dans les évènements d'échouages et trouver des solutions de mitigations des échouages.

5 Conclusion

La mise à jour des données de survols dans la zone CAPECET en 2024 a permis d'effectuer des cartes de krigeage par session pour les 3 années de survols 2020, 2023 et 2024. La méthode de krigeage par processus gaussien avec auto-régression temporelle traduit de manière fidèle les hotspots de petits delphininés observés par survol aérien. De plus, les densités obtenues par krigeage sont sensiblement les mêmes que les densités obtenues par CDS (Distance Sampling). Les résultats obtenus peuvent être utilisés en complément des données de proies issues des échantillonnages par le drone DriX.

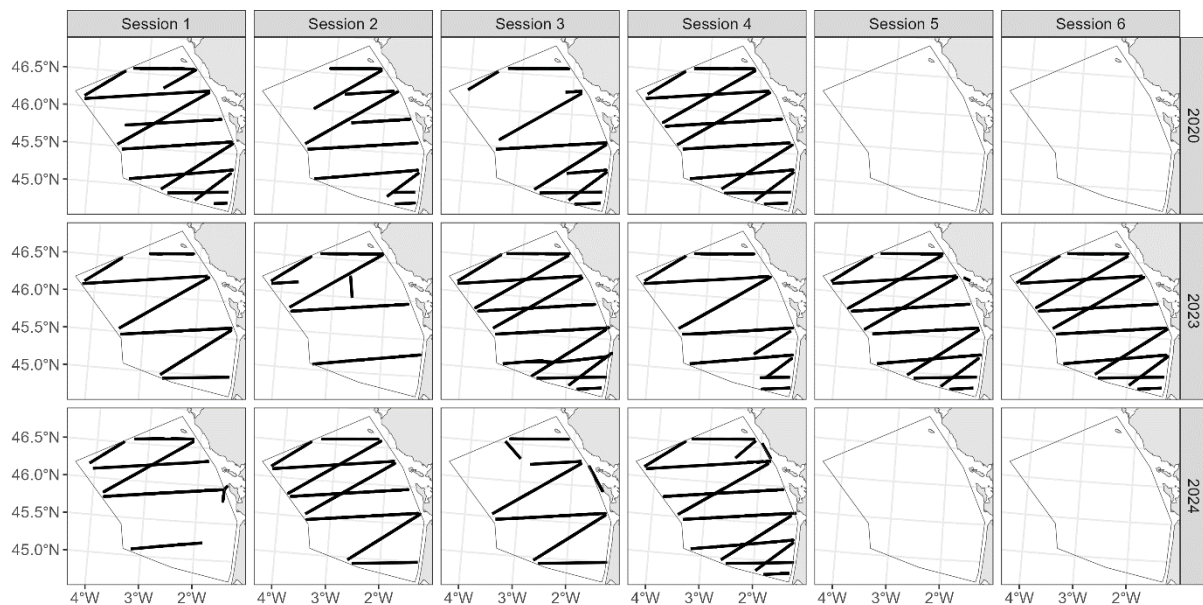
Les pics de densités des petits delphininés pour 2020 et 2024 apparaissent en mars et sont au large alors qu'en 2023 le pic de densité apparaît en février avec une distribution côtière. Ces informations, mises en lien avec les données de conditions météorologiques (vent) locales, permettent de faire des corrélations sur les événements d'échouages qui ont pu avoir lieu pendant les hivers 2020, 2023 et 2024, même si l'année 2024 constitue une année particulière du fait de la mise en place d'une période de fermeture du 22 janvier au 20 février.

6 Bibliographie

- DGAMPA (Direction générale des affaires maritimes et de la pêche de l'aquaculture) (2024). Suivi de la période à risque pour les captures accidentelles de petits cétacés en Atlantique, Bulletin n°8
- Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M. D., Lee, D., Goodrich, B., Betancourt, M., Brubaker, M., Guo, J., Li, P., Riddell, A. (2017) Stan: A Probabilistic Programming Language. *Journal of Statistical Software*, Vol. 76, No. 1, p. 1-32
- Gorgi, P. (2020) Beta–negative binomial auto-regressions for modelling integer-valued time series with extreme observations. *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 82, No. 5, p. 1325-1347
- Van Canneyt, O., A. Blanchard, S. Laran, G. Dorémus, M. Genu, T. Sanchez, et J. Spitz (2024). Rapport de campagne CAPECET II (campagne d'observation aérienne de la mégafaune marine). La Rochelle : Observatoire Pelagis (UAR 3462, Université de La Rochelle / CNRS).
- Wilke, C. K. (2003) Hierarchical Models in Environmental Science. *International Statistical Review*, Vol. 71, No. 2, p. 181-199

7 Annexes

Annexe 1 : Cartes des efforts par session et années



Annexe 2 : Script du code STAN permettant l'ajustement du modèle de krigeage par processus gaussien

```

fonctions {
  matrix kron_mvprod(matrix A, matrix B, matrix V)
  {
    return transpose(A*transpose(B*V));
  }

  matrix gp(int N_rows, int N_columns, real[] rows_idx, real[] columns_index,
            real delta0,
            real alpha_gp,
            real rho_gp1, real rho_gp2,
            matrix z1)
  {

    matrix[N_rows,N_columns] GP;

    matrix[N_rows, N_rows] K1;
    matrix[N_rows, N_rows] L_K1;

    matrix[N_columns, N_columns] K2;
    matrix[N_columns, N_columns] L_K2;

    for(i in 1:N_rows) {
      for(j in 1:N_rows) {
        K1[i, j] = alpha_gp * (1 + fabs(i - j) * sqrt(3) / rho_gp1) * exp(-fabs(i - j) * sqrt(3) / rho_gp1);
      }
    }
    K1 = K1 + diag_matrix(rep_vector(delta0, N_rows));

    for(i in 1:N_columns) {
      for(j in 1:N_columns) {

```

```

    K2[i, j] = alpha_gp * (1 + fabs(i - j) * sqrt(3) / rho_gp2) * exp(-fabs(i - j) * sqrt(3) / rho_gp2);
  }
}
K2 = K2 + diag_matrix(rep_vector(delta0, N_columns));

L_K1 = cholesky_decompose(K1);
L_K2 = cholesky_decompose(K2);

GP = kron_mvprod(L_K2, L_K1, z1);

return(GP);
}

real beta_neg_binomial_lpmf(int y, real size_param, real shape_param, real location_param) {
  // size is the size parameter of the negative binomial distribution
  // prob is the probability parameter of the the negative binomial distribution
  // shape the first shape parameter of the beta distribution
  // shape2 the second shape parameter of the beta distribution
  // location is the mean of the beta-negative-binomial parameter
  real value;
  real shape2 = (shape_param - 1) * location_param / size_param;

  // sanity checks
  if (size_param > 1E8) {
    value = negative_infinity();
  } else if (shape_param > 1E8) {
    value = negative_infinity();
  } else if (shape2 > 1E8) {
    value = negative_infinity();
  } else if (size_param <= 1E-8) {
    value = negative_infinity();
  } else if (shape_param <= 1E-8) {
    value = negative_infinity();
  } else if (shape2 <= 1E-8) {
    value = negative_infinity();
  } else {
    // numerator
    value = lgamma(y + size_param) - lgamma(y + 1) - lgamma(size_param);
    // and denominator
    value += lbeta(shape_param + size_param, shape2 + y) - lbeta(shape_param, shape2);
  }
  return value;
}

}

data {
  // distance sampling
  int<lower = 1> n_det;
  int<lower = 1> n_level;
  real BEAUFORT[n_level];
  real<lower = 0.0> w; // truncation distance
  int<lower = 1> BEAUFORT_det[n_det];
  vector<lower = 0.0, upper = w>[n_det] DISTANCE;
  real<lower = 0.0> prior_scale_sigma;
  // density surface model
  int<lower = 1> n_seg;

```

```

int<lower = 1> n_year;
int<lower = 1> n_session;
int<lower = 0> COUNT[n_seg];          // response variable
vector<lower = 0.0>[n_seg] EFFORT;    // offset
int<lower = 1> BEAUFORT_seg[n_seg];
int<lower = 1, upper = n_year> YEAR[n_seg]; // year
int<lower = 1, upper = n_session> SESSION[n_seg]; // session
real prior_location_intercept;
real<lower = 0.0> prior_scale_intercept;
// spatial: BSplines to approximate GP
int<lower = 1> n_cell;
int<lower = 1> n_row;
int<lower = 1> n_col;
int<lower = 0, upper = n_cell> IDROW[n_seg];
int<lower = 0, upper = n_cell> IDCOL[n_seg];
int num_basis_rows;
int num_basis_columns;
matrix[num_basis_rows, n_row] BASIS_ROWS;
matrix[num_basis_columns, n_col] BASIS_COLUMNS;
real IDX_BASIS_ROWS[num_basis_rows];
real IDX_BASIS_COLUMNS[num_basis_columns];
}

transformed data {
  real eps = 1e-9;
  real prior_scale_delta = log2() / 2;
}

parameters {
  vector[n_session] unscaled_intercept[n_year];
  // overdispersion
  real<lower = 0.0, upper = 1.0> inv_alpha;
  // temporal
  real<lower = -1.0, upper = 1.0> temporal_range[n_year];
  // spatial
  real<lower = 0.0> rho_1;
  real<lower = 0.0> rho_2;
  real<lower = 0.0> alpha_gp;
  matrix[num_basis_rows, num_basis_columns] eta[n_year, n_session];
  // distance sampling
  vector<lower = 0.0>[2] unscaled_sigma2;
  vector<lower = 0.0>[2] tau;
  real unscaled_delta;
}

transformed parameters {
  matrix[num_basis_rows, num_basis_columns] beta[n_year, n_session];
  matrix[n_row, n_col] latent[n_year, n_session];
  real r = 1 / (unscaled_sigma2[2] / tau[2]); // size parameter, https://github.com/stan-dev/rstanarm/issues/275
  real alpha = 1 / inv_alpha; // shape parameter > 1
  vector[n_session] intercept[n_year];
  vector[n_seg] log_lik;
  // distance sampling
  real delta = unscaled_delta * prior_scale_delta;
  vector[n_level] sigma;
  vector[n_level] esw;
}

```

```

for(k in 1:n_level) {
  sigma[k] = prior_scale_sigma * sqrt(unscaled_sigma2[1] / tau[1]) * exp(delta * BEAUFORT[k]);
  esw[k] = (normal_cdf(w, 0.0, sigma[k]) - 0.5) * exp(-normal_lpdf(0.0 | 0.0, sigma[k]));
}
// spatial effects
for(k in 1:n_year) {
  intercept[k] = prior_location_intercept + prior_scale_intercept * unscaled_intercept[k];
  for(l in 1:n_session) {
    beta[k, l] = gp(num_basis_rows, num_basis_columns,
      IDX_BASIS_ROWS, IDX_BASIS_COLUMNS,
      eps, alpha_gp, rho_1, rho_2,
      eta[k, l]);
  }
  // temporal correlation
  latent[k, 1] = (BASIS_ROWS') * beta[k, 1] * BASIS_COLUMNS; // initial condition
  for(l in 2:n_session) {
    latent[k, l] = temporal_range[k] * latent[k, l - 1];
    latent[k, l] += sqrt(1 - square(temporal_range[k])) * ((BASIS_ROWS') * beta[k, l] * BASIS_COLUMNS);
  }
}
// linear predictor
for(i in 1:n_seg) {
  log_lik[i] = beta_neg_binomial_lpmf(COUNT[i] | r, alpha, (2 * EFFORT[i] * esw[BEAUFORT_seg[i]]) * exp(intercept[YEAR[i],
SESSION[i]] + latent[YEAR[i], SESSION[i], IDROW[i], IDCOL[i]]));
}
}

model {
  rho_1 ~ inv_gamma(5.0, 5.0);
  rho_2 ~ inv_gamma(5.0, 5.0);
  alpha_gp ~ std_normal();
  for(i in 1:num_basis_rows) {
    for(j in 1:num_basis_columns) {
      for(k in 1:n_year) {
        for(l in 1:n_session) {
          eta[k, l, i, j] ~ std_normal();
        }
      }
    }
  }
  for(k in 1:n_year) {
    unscaled_intercept[k] ~ std_normal();
  }
  for(i in 1:n_seg) {
    target += log_lik[i];
  }
  // distance sampling
  unscaled_delta ~ normal(0.0, 1.0);
  unscaled_sigma2 ~ gamma(0.5, 1.0);
  tau ~ gamma(1.0, 1.0);
  for(j in 1:n_det) {
    target += normal_lpdf(DISTANCE[j] | 0.0, sigma[BEAUFORT_det[j]]);
  }
}

```