


MIGRALION

Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion
par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine
à l'aide de méthodes complémentaires

**Lot 6 : Développement de méthodes permettant l'analyse des
différentes données produites dans le cadre du programme et issues
d'autres projets**

Second rapport d'analyse méthodologique et des données acquises (années 1 et 2)

Livrable L33

mars 2024

Partenaires scientifiques et techniques



Financeurs du programme



Programme financé par le Ministère de la Transition
écologique, la Région Sud et la Région Occitanie

SUIVI DU DOCUMENT

Auteurs	Coline Canonne ; Valentin Lauret, Louis Schroll, Sébastien Roques, Aurélien Besnard	France Énergies Marines (FEM) Centre d'Écologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) – EPHE
Coordination scientifique et technique du projet	Aurélien Besnard Yann Planque	CEFE – EPHE France Énergies Marines (FEM)
Coordination du projet	Claire Hébert	Office Français de la Biodiversité (OFB)
Titre du document	Migralion - Second rapport d'analyse méthodologique et des données acquises (années 1 et 2) – livrable L33 – Lot 6 : Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets	
Citation du document	CANONNE, C., LAURET, V., SCHROLL, L., ROQUES, S., BESNARD, A. 2024. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : Second rapport d'analyse méthodologique et des données acquises (années 1 et 2). Lot 6 : Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets. <i>Rapport pour l'OFB</i> . 21 PP.	
Statut du document	Version finale	
Date de sauvegarde	24/04/2024	
Date de diffusion	25/04/2024	
Version du document	3	
Nom du fichier	MIGRALION_Lot 6_L33_Rapportd'analyse2_2024-03.pdf	
Nombre de pages	21	
Niveau de diffusion	Consortium / Gouvernance/ Public	

HISTORIQUE DES CHANGEMENTS

Version	Date	Modifié par	Modifications / Sections
1	15/03/2024	Coline Canonne, Valentin Lauret, Louis Schroll, Sébastien Roques, Aurélien Besnard	Document initial
2	18/04/2024	Jehanne Rivet (FEM), Claire Hébert (OFB)	Mise à jour du format Relecture globale et corrections mineures dans l'ensemble du document
3	23/04/2024	Coline Canonne	Corrections mineures dans l'ensemble du document

APPROBATION

Version	Date	Approuvé par	Titre
Finale	24/04/2024	Yann Planque, FEM	Coordinateur scientifique et technique
Signature : 			
Finale	25/04/2024	Claire Hébert, OFB	Coordinatrice du projet
Signature : 			

Table des matières

Objectifs du programme	5
Objectifs de ce rapport	5
Lot 6 : Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets	6
1 Rappels sur les objectifs du lot	6
1.1 Consortium du lot 6	6
1.2 Objectifs généraux du lot 6.....	6
2 Description des données mobilisables.....	8
2.1 Données historiques	8
2.2 Données MIGRALION.....	8
2.2.1 Télémétrie	8
2.2.2 Campagnes en mer par bateau	8
2.2.3 Radars ornithologiques à la côte.....	9
2.3 Données Radar météo	10
3 Premières analyses et difficultés identifiées.....	10
3.1 Comptages/observations en mer	10
3.2 Radar à la côte	13
3.2.1 Structure des données	13
3.2.2 Variabilité spatiales et temporelles du nombre d'échos	13
3.2.3 Intensité de migration et définition de périodes de migration	15
3.2.4 Hauteurs de vol	16
3.2.5 Directions de vol	17
Références bibliographiques.....	19

Table des figures

Figure 1 : NOMBRE D'INDIVIDUS COMPTÉS PAR ESPÈCE D'OISEAU MARIN POUR CHAQUE SAISON D'OBSERVATION (PRÉNUPTIALE : DE MARS À MAI, POSTNUPTIALE : DE SEPTEMBRE À NOVEMBRE) LORS DES COMPTAGES VISUELS DES CAMPAGNES EN MER DE 2022 ET 2023 (LOT 4 MIGRALION).	9
Figure 2 : CARTE DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES SÉLECTIONNÉES POUR MODÉLISER LA DISTRIBUTION DES OISEAUX MARINS DANS LE GOLFE DU LION À PARTIR DES DONNÉES DE COMPTAGES.	11
Figure 3 : RESULTATS PRELIMINAIRES : PROBABILITÉ DE PRÉSENCE (ET INCERTITUDE ASSOCIÉE) DE TROIS ESPÈCES D'OISEAUX MARINS DANS LE GOLFE DU LION EN DEHORS DE LEUR PÉRIODE DE REPRODUCTION : STERNES CAUGEKS, PETITS PUFFINS (PUFFIN YELKOUAN ET DES BALÉARES) ET MOUETTES PYGMÉES.	12
Figure 4 : RESULTATS PRELIMINAIRES : NOMBRE DE CIBLES ENREGISTRÉES ET CLASSÉES PAR MOIS (À GAUCHE) ET PAR HEURE (À DROITE). SUR L'HISTOGRAMME DE GAUCHE LES CIBLES SONT ASSIGNÉES AU SITE SUR LEQUEL ELLES ONT ÉTÉ ENREGISTRÉES (COULEURS), TANDIS QUE SUR CELUI DE DROITE LES CIBLES SONT CLASSÉES SELON L'HEURE DU COUCHER DU SOLEIL (JOUR EN JOUR, NUIT EN TURQUOISE).	14
Figure 5 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DIFFÉRENCE ENTRE L'HEURE DE COUCHER DU SOLEIL ET L'HEURE DE RELEVÉ, PAR LOCALISATION (GAUCHE) ET TYPE D'OISEAUX (À DROITE).	14
Figure 6 : RESULTATS PRELIMINAIRES : FRÉQUENCE DE PROBABILITÉS D'ASSIGNATION À LA CLASSE PAR LES RADARS À LA CÔTE.	15
Figure 7 : RESULTATS PRELIMINAIRES : ÉVOLUTION DU MTR MOYEN PAR NUIT AU COURS DE L'ANNÉE (À GAUCHE) ET EN SOMME CUMULÉE ORDONNÉE (À DROITE, EN BLEU MTR DE NUIT ET EN ORANGE MTR DE JOUR).	15
Figure 8 : RESULTATS PRELIMINAIRES : INDEX MIGRATOIRE (MTR MOYEN PAR NUIT * VECTEUR DE RÉSULTANTE MOYENNE DES DIRECTIONS PAR NUIT) AU COURS DES NUITS EN AUTOMNE. LA LIGNE VIOLETTE REPRÉSENTE LA VALEUR MOYENNE DE L'INDEX, ET LA COURBE BLEUE UNE COURBE LOESS (FAMILLE GAUSSIENNE).	16
Figure 9 : RESULTATS PRELIMINAIRES : FRÉQUENCE DU NOMBRE D'ÉCHOS SELON L'ALTITUDE.	16
Figure 10 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE VOL MESURÉES PAR CIBLES POUR CHACUN DES SITES (PANELS) DURANT LA PÉRIODE DE MIGRATION PRÉ-NUPTIALE 2022. EN POINTILLÉ EST REPRÉSENTÉE LA DIRECTION MOYENNE PAR SITE.	18
Figure 11 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE VOL MESURÉES PAR CIBLES POUR CHACUN DES SITES (PANELS) DURANT LA PÉRIODE DE MIGRATION POST-NUPTIALE 2022. EN POINTILLÉ EST REPRÉSENTÉE LA DIRECTION MOYENNE PAR SITE.	18
Figure 12 : RESULTATS PRELIMINAIRES : PROPORTION DE VALEURS DE DIRECTIONS MANQUANTES SELON LE TYPE D'OISEAUX (À GAUCHE) ET LA TRANCHE ALTITUDINALE (À DROITE).	19

Objectifs du programme

Le constat de déficit de connaissances sur les migrateurs terrestres, les zones fonctionnelles des oiseaux marins et des chiroptères a été mis en évidence en Méditerranée française par la communauté scientifique, les associations environnementales et les gestionnaires d'espaces naturels, notamment en lien avec le développement de nouvelles activités anthropiques en mer.

Or, dans un contexte de développement de projets en mer Méditerranée, notamment de centrales éoliennes offshore dans le golfe du Lion, il est apparu essentiel d'acquérir des connaissances permettant de caractériser les flux migratoires et les fonctionnalités des zones en mer pour l'avifaune et les chiroptères, à l'échelle du golfe du Lion, que ce soit pour des espèces résidentes ou ponctuellement présentes.

Pour répondre à ces besoins, l'Office français de la biodiversité a lancé le programme MIGRALION qui a pour objectif d'étudier les thématiques suivantes : passages migratoires en mer de l'avifaune migratrice et des chiroptères (routes préférentielles, flux et altitudes) ainsi que l'utilisation en trois dimensions de l'espace marin par les oiseaux marins. Une vaste diversité de moyens humains et technologiques sont déployés de manière complémentaire : observations visuelles à terre et en mer, baguage, télémétrie, radars ornithologiques et de navigation, récepteurs/enregistreurs acoustiques et à ultrasons. L'ensemble des données collectées ainsi que les données historiques accessibles seront analysés grâce à une méthode d'analyse combinée de données multi-sources développée spécialement dans le cadre du programme. Les différents modules (lots) de l'étude, débutée le 31 mars 2021, sont portés par une douzaine de structures expertes (associatives, académiques, bureau d'étude, etc.) ayant collaboré à l'élaboration de propositions complémentaires pour les 6 lots.

Ainsi ce vaste programme a pour ambition d'apporter des éléments de connaissance sur la faune volante terrestre et marine avec des données inédites sur la spatio-temporalité des déplacements locaux et les migrations des espèces à travers le golfe du Lion. Ces informations aideront à caractériser les menaces qui pèsent sur les populations, dont plusieurs sont en déclin. Il sera alors possible de déterminer comment optimiser le réseau d'espaces naturels protégés, en mer et à terre, d'améliorer les pratiques de gestion de ces espaces, d'ajuster si besoin les programmes de développement d'infrastructures, et de mieux réguler les activités anthropiques responsables de la dégradation de l'état des populations.

Objectifs de ce rapport

Ce rapport fait le point sur l'état d'avancement de l'acquisition des données du programme et présente deux analyses exploratoires des données récupérées à ce jour par le lot 6. Une première analyse présente les travaux d'un stage en cours concernant l'analyse intégrée de plusieurs campagnes en mer fournissant des données de comptage pour les oiseaux marins (jusqu'en 2023) et une seconde porte sur l'analyse des données radar à la côte pour les migrateurs terrestres (données temporaires 2022). Ce diagnostic des données disponibles et ces premières analyses permettent de faire émerger des problématiques et questionnements qui serviront à nourrir la discussion entre partenaires puis guider les choix futurs concernant les analyses formelles des données validées et définitives.

Lot 6 : Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets

1 Rappels sur les objectifs du lot

1.1 Consortium du lot 6

Ce document s'inscrit dans le cadre du lot n°6 du programme MIGRALION dont France Energies Marines (FEM), le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive de Montpellier (CEFE) et la Tour du Valat (TDV) sont titulaires.

L'institut France Energies Marines France Energies Marines (FEM) est l'Institut pour la Transition Énergétique dédié aux énergies marines renouvelables (EMR). Sa mission : fournir, valoriser et alimenter l'environnement scientifique et technique nécessaire au développement de cette filière en pleine expansion. Fort d'une équipe pluridisciplinaire de plus de 50 collaborateurs et d'un modèle de collaboration public-privé, France Energies Marines s'appuie sur quatre programmes de R&D transversaux et complémentaires : caractérisation de sites, dimensionnement et suivi des systèmes, intégration environnementale et optimisation des parcs.

La Tour du Valat est un institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes, basée en Camargue sous le statut d'une fondation privée reconnue d'utilité publique. L'objectif principal de la Tour du Valat est de changer le comportement et les décisions des gouvernements et de la société en général dans le bassin méditerranéen afin que les zones humides soient conservées et gérées de façon durable.

Le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive de Montpellier est un des plus importants laboratoires d'Écologie en Europe (UMR5175 CEFE). Le projet du CEFE vise à comprendre la dynamique, le fonctionnement et l'évolution du vivant. Il s'appuie sur trois ambitions : [1] comprendre le monde vivant pour anticiper ce que sera demain, [2] conduire à des innovations et répondre aux attentes de la société ; [3] pratiquer une science « rassembleuse » et diverse dans ses approches disciplinaires.

1.2 Objectifs généraux du lot 6

L'objectif de ce lot est de développer des méthodologies de traitement et d'analyses statistiques des données acquises par les moyens déployés dans les lots 3, 4 et 5 de manière à caractériser de manière robuste la migration de l'avifaune terrestre et l'utilisation de l'espace par l'avifaune marine au-dessus du golfe du Lion. Il s'agit en particulier de :

- Veiller à la cohérence des différents plans d'échantillonnage spatio-temporels prévus dans les lots 3, 4 et 5 pour s'assurer que les données obtenues pourront être comparées et agrégées dans des analyses combinées
- Compléter la synthèse bibliographique en analysant les données recensées dans le lot 1 et non traitées
- Proposer une analyse critique des jeux de données acquis et notamment de leur représentativité spatio-temporelle
- Identifier, sélectionner et développer une ou des méthodes d'analyse des données permettant leur analyse combinée pour répondre aux objectifs du programme MIGRALION

Aujourd'hui, aucune technologie ne permet de collecter l'ensemble des informations nécessaires pour décrire les flux migratoires en quatre dimensions (longitude, latitude, altitude et temps) à l'échelle d'une zone aussi grande que celle du golfe de Lion. Les lots 3 à 5 visent donc à utiliser différentes technologies permettant de collecter des informations complémentaires pour décrire la migration en Méditerranée. Prises indépendamment, ces données ne fournissent qu'une information partielle et limitée sur l'organisation (notamment spatiale) des flux migratoires dans le golfe du Lion. Leur combinaison formelle dans un cadre d'analyse unifié est donc une nécessité pour le programme MIGRALION. Par ailleurs, la collecte d'informations de différente nature sur l'utilisation de l'espace par les oiseaux marins (suivi GPS de différentes espèces aux écologies différentes, recensement des colonies, etc.) implique là aussi le développement de méthodes d'analyses permettant la combinaison à la fois des données de nature différentes mais aussi obtenues sur différentes espèces.

En quelques années, la combinaison de données issues de sources hétérogènes s'est imposée comme une démarche de modélisation permettant de tirer le meilleur parti de l'accumulation de données collectées par des approches différentes sur un même système écologique. Cette approche nommée (selon le type de données mobilisées mais aussi selon le degré de formalisation de la combinaison) data fusion, data combination ou data integration, permet en effet de modéliser, dans un même cadre formel, des données de sources différentes, collectées avec des techniques différentes et selon des plans d'échantillonnage eux aussi hétérogènes (voir par exemple Crawford *et al.*, 2018 ; Isaac *et al.*, 2020 ; Miller *et al.*, 2019 ; Pacifici *et al.*, 2019 ; Zipkin & Saunders, 2018). Des travaux récents, menés par les chercheurs coordinateurs de ce lot, ont par exemple montré qu'il était possible de combiner des données de recensements standardisés et des données opportunistes pour acquérir une meilleure précision sur la distribution d'espèces (Renner *et al.*, 2019). Malgré tout, la combinaison de données reste une approche récente et novatrice dont les exemples sont restreints à quelques types de données bien spécifiques. L'approche est maintenant très bien développée en dynamique des populations via la combinaison de données de capture-recapture et de comptages (voir par exemple Arnold *et al.*, 2018 ou Riecke *et al.*, 2019) mais est balbutiante sur les questions de connectivité migratoire (voir par exemple Korner-Nievergelt *et al.*, 2017 ou Zhu *et al.*, 2020) et n'a, à notre connaissance, jamais été développée pour la modélisation des flux d'oiseaux migrateurs. Des articles récents ont discuté l'intérêt de combiner des données de flux migratoires issus de données collectées par des radars météorologiques avec des données de comptages sur des sites à la côte, mais ces articles ne proposent pas l'approche méthodologique permettant concrètement cette combinaison (Shipley *et al.*, 2018 ; Weisshaupt *et al.*, 2021). Certains travaux se sont intéressés à évaluer la cohérence de différentes sources de données (par exemple observateurs versus radar, Schmidt *et al.*, 2017) mais là encore, il ne s'agissait pas de combinaison. De ce fait, le travail à mener sur ce lot 6 visant à combiner/intégrer les nombreuses sources de données, hétérogènes, dans un même cadre, relève d'une démarche de recherche pour laquelle il est à ce stade difficile de déterminer jusqu'où cette intégration sera possible. Le groupe de chercheurs mobilisés pour ce lot dispose cependant d'une expertise de très haut niveau sur ces questions d'intégration de données et maîtrise les différents outils de modélisation utilisés pour chaque source de données différente.

2 Description des données mobilisables

2.1 Données historiques

Le lot 1 porté par La Tour du Valat a consisté en un recensement des données disponibles sur l'avifaune dans le golfe du Lion en amont des collectes de MIGRALION. Ce travail a permis de constituer un état des lieux des programmes de collecte mis en œuvre jusque-là et dans certains cas les données ont pu être récupérées. Dans le cadre du lot 6, nous avons examiné le type de données récoltées par le lot 1 et identifié les jeux de données a priori pertinents pour nos travaux de modélisation intégrée. Nous renvoyons au Livrable 32 dans lequel nous présentons les jeux de données récupérés que nous mobilisons actuellement dans les analyses intégrées.

2.2 Données MIGRALION

2.2.1 Télémétrie

La quantité et la qualité de l'information extraite des oiseaux équipés de GLS représente un défi pour l'intégration des données. Comme précisé lors du livrable L32, les données de GLS permettent de fournir des informations sur l'altitude de vol et la phénologie de migration des espèces. Cependant la précision des données GLS est trop limitée pour décrire les déplacements à l'échelle du golfe du Lion (voir néanmoins Fauchald et *al.*, 2024). D'après les discussions avec les porteurs du lot 3, les déplacements à l'échelle du golfe du Lion seront connus pour seulement quelques oiseaux, ce qui est trop peu pour espérer que l'analyse intégrée avec d'autres données influe sur les résultats généraux de ces analyses intégrées. Nous n'avons donc à ce jour pas prévu d'utiliser ces quelques données GLS pour étudier les flux migratoires dans le golfe du Lion.

Concernant les données GPS, nous attendons les extractions de ces données et les analyses qui doivent être réalisées par le lot 3. Cependant, étant donné le nombre important d'oiseaux capturés en Camargue par rapport au reste du littoral du golfe du Lion, il semble difficile de pouvoir généraliser les trajectoires sans passer par une étape de modélisation fine de l'utilisation de l'espace basée sur des covariables environnementales. Ce point est en cours de discussion avec les porteurs du lot 3. Nous explorons toutefois leur intégration dans les modèles de prédiction des flux et de hauteur de vol à partir des données radar dans le golfe du Lion (voir L34).

2.2.2 Campagnes en mer par bateau

Les campagnes en mer réalisées dans le cadre de MIGRALION prennent la forme de quatre campagnes par an, mises en œuvre entre les mois de mars et de mai et de septembre et novembre. Près de 1000 kilomètres de transects sont réalisés lors de chacune des campagnes. Les transects parcourus couvrent l'ensemble du plateau continental du golfe du Lion, ainsi que les têtes de canyons. Leur mise en œuvre est optimisée de façon à couvrir au mieux la zone d'étude à la fois de jour et de nuit au cours de la période de migration visée. Trois types de données sont récoltées :

- Des observateurs comptent en continu les oiseaux marins et les migrateurs, du lever du jour au coucher du soleil, et notent systématiquement toutes les observations réalisées, avec si possible une estimation de la hauteur et de la distance (Figure 1).
- Un enregistreur acoustique dédié aux oiseaux permet de détecter les éventuels cris émis.
- Deux radars de navigation sont équipés de moyens d'enregistrement de données en continu. Un radar dédié au suivi en mode vertical (1500 m de rayon) renseigne sur les déplacements de l'avifaune marine et migratrice (notamment les altitudes de vol) et des flux associés. Le radar en mode horizontal (6 km

de rayon) permet quant à lui l'acquisition de données renseignant la distribution et les déplacements des oiseaux en mer (notamment les directions de vol).

A la date de rédaction de ce livrable, nous avons accès aux données d'observations visuelles pour les années 2022 et 2023. Pour le moment, notre lot n'a pas encore récupéré les données radar ni acoustiques collectées en mer, qui sont en cours de traitement par le lot 4.

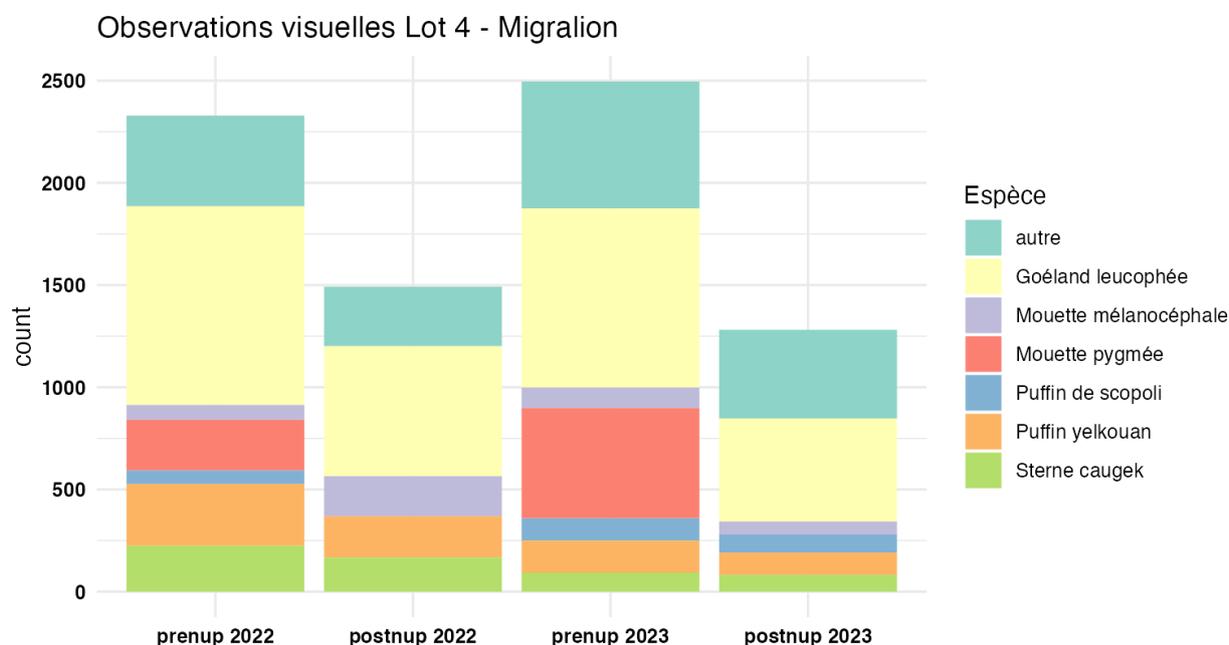


Figure 1 : NOMBRE D'INDIVIDUS COMPTÉS PAR ESPÈCE D'OISEAU MARIN POUR CHAQUE SAISON D'OBSERVATION (PRÉNUPTIALE : DE MARS À MAI, POSTNUPTIALE : DE SEPTEMBRE À NOVEMBRE) LORS DES COMPTAGES VISUELS DES CAMPAGNES EN MER DE 2022 ET 2023 (LOT 4 MIGRALION).

2.2.3 Radars ornithologiques à la côte

Deux radars BirdScan MR1 développés par la société Swiss Birdradar en partenariat avec la station ornithologique suisse de Sempach ont été installés sur le littoral méditerranéen, dans le cadre du lot 5 de MIGRALION (Schmid *et al.*, 2019). Il s'agit d'un système de radar compact conçu pour la surveillance quantitative à long terme des oiseaux, qui utilise une antenne à ouverture large de forme conique dirigée verticalement et mise en rotation (Wills *et al.*, 2017). Cette technologie permet d'enregistrer pour chaque cible les caractéristiques suivantes :

- Hauteur au-dessus du sol
- Direction de vol
- Vitesse
- Fréquence de battement d'ailes et surface de réflexion (fréquence qui permet de classer les échos en différentes catégories, notamment précipitations, insectes, oiseaux (passereau de petite taille, passereau de grande taille, passereau, oiseau d'eau, grand oiseau, groupe d'oiseau, oiseau non identifié).

Le filtrage et la classification des échos ainsi récoltés est en cours de traitement par le lot 5 de MIGRALION. Dans ce rapport, nous explorons les données récoltées en 2022 afin de repérer et d'anticiper de potentielles difficultés ou points de blocage. Cependant, il est à noter que ces données sont en cours de correction par Biotope et

seront modifiées dans les mois à venir. Les résultats exploratoires illustrés ci-dessous sont donc à titre purement informatif et ne servent qu'à la réflexion méthodologique.

En parallèle des enregistrements radars, des informations complémentaires sont collectées par le lot 5 de MIGRALION : à l'aide d'enregistreurs acoustiques, d'observations visuelles et de sessions de baguages/recaptures (Schmidt *et al.*, 2017). Ces données n'ont pour le moment pas encore été transmises au lot 6. Ces informations pourront servir d'éléments de comparaison permettant d'identifier de potentiels biais de détection (nuit/jour, espèces) et éventuellement d'échantillonnage (extrapolation possible depuis le site de la Palissade par exemple) associés aux relevés radars (Nilsson *et al.*, 2018). Néanmoins, ces relevés étant ponctuels dans l'espace et peu nombreux, l'intégration dans un modèle formel sera probablement compliquée et peu informative.

2.3 Données Radar météo

Le travail de simulation effectué sur la modélisation des flux migratoires pour la façade Atlantique (voir rapport L34) souligne l'importance des données issues des radars météo dans la précision de l'inférence des flux, notamment car l'échelle spatiale couverte par ces derniers est bien plus large (et donc bien plus informative) que les radar BirdScan à la côte. Il nous paraîtrait alors judicieux de poursuivre les démarches pour essayer de récupérer ces données pour la façade Méditerranée ; dont le croisement avec les données de radars à la côte permettrait de véritablement élargir l'échelle spatiale du modèle. Il apparaît clairement au vu des premiers essais de modélisation des flux que ce type de données pourrait être fondamentale pour faciliter l'analyse intégrée de différentes sources de données.

3 Premières analyses et difficultés identifiées

3.1 Comptages/observations en mer

Comme décrit dans le Livrable 34, les données de comptage sont en cours d'analyse. Il s'agit d'analyses intégrant à la fois les données de MIGRALION et de PELMED. Les cartes de distribution des oiseaux marins à partir de modèles intégrant les données historiques et les données du Lot 4 de MIGRALION collectées jusqu'à fin 2023 devraient être disponibles au cours de l'année (été 2024). Nous représenterons une carte de probabilité d'utilisation de l'espace ainsi qu'une carte de l'incertitude associée. Nous modélisons la distribution d'une espèce en fonction de variables environnementales. Parmi les variables possibles, nous avons retenu la température de l'eau en surface, la bathymétrie, la distance à la côte, la concentration de Chlorophylle A, l'anomalie d'hauteur de l'eau, et la concavité du fond marin qui sont des variables classiquement utilisées en milieu marin et en particulier pour les oiseaux (Figure 2).

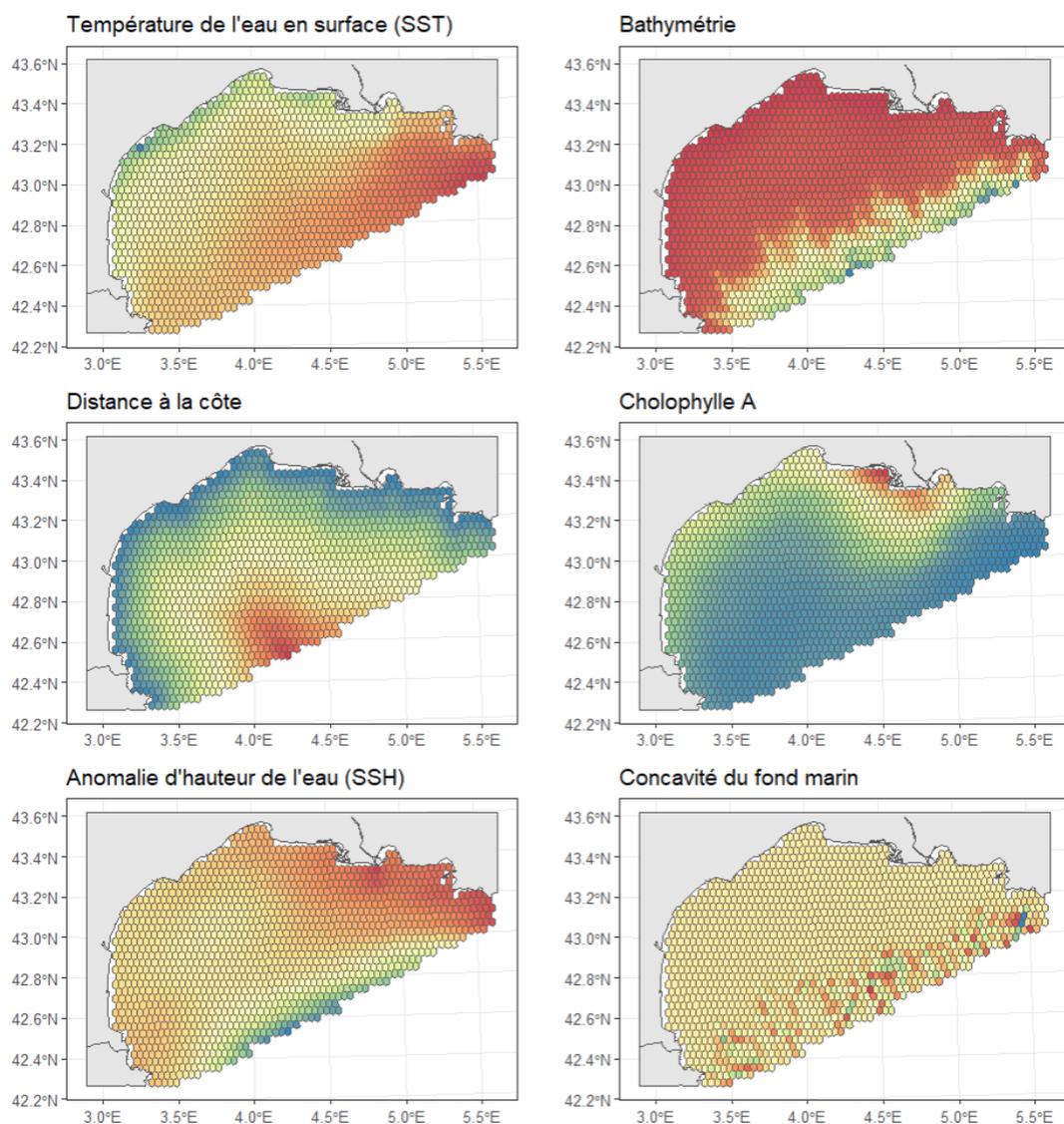


Figure 2 : CARTE DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES SÉLECTIONNÉES POUR MODÉLISER LA DISTRIBUTION DES OISEAUX MARINS DANS LE GOLFE DU LION À PARTIR DES DONNÉES DE COMPTAGES.

Pour chaque espèce, nous sélectionnons les variables qui expliquent le mieux la distribution de l'espèce à partir d'une procédure de validation croisée (un type de procédure de sélection de modèle) et nous estimons leurs effets (voir livrable 34). Ensuite, nous prédisons la distribution de l'espèce ciblée comme une combinaison de ces variables environnements (cf Figure 3). La figure 3 présente un aperçu des cartes de distribution telles qu'elles seront une fois finalisées à la suite de l'intégration des données des 3 années de suivi, accompagnées d'une carte des incertitudes associées à la prédiction. Les cartes présentées ci-dessous représentent la distribution des sternes caugeks, des petits puffins (puffin Yelkouan et des Baléares analysés ensemble), et des mouettes pygmées en dehors de leur période de reproduction.

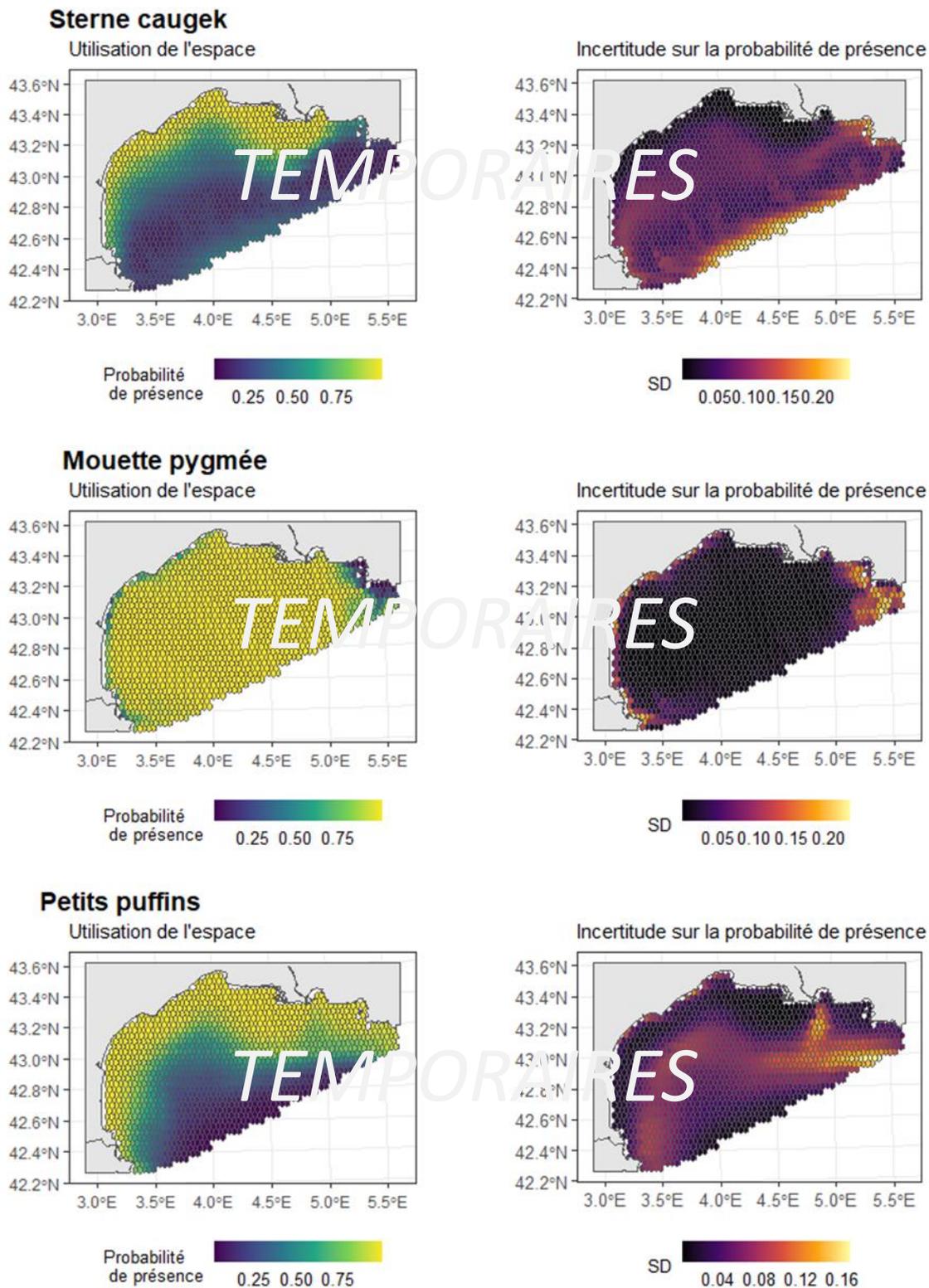


Figure 3 : RESULTATS PRELIMINAIRES : PROBABILITÉ DE PRÉSENCE (ET INCERTITUDE ASSOCIÉE) DE TROIS ESPÈCES D'OISEAUX MARINS DANS LE GOLFE DU LION EN DEHORS DE LEUR PÉRIODE DE REPRODUCTION : STERNES CAUGEKS, PETITS PUFFINS (PUFFIN YELKOUAN ET DES BALÉARES) ET MOUETTES PYGMÉES.

3.2 Radar à la côte

3.2.1 Structure des données

Comme précisé ci-dessus dans la partie présentation des données disponibles : le filtrage et la classification des échos récoltés est en cours de traitement par le lot 5 MIGRALION, et les données seront affinées dans les mois à venir. Dans cette partie, nous explorons les données récoltées en 2022 afin de repérer et d'anticiper de potentielles difficultés ou points de blocage. Les éléments exploratoires illustrés ici sont donc présentés à titre purement informatifs et ne servent qu'à la réflexion méthodologique. L'objectif est de déterminer comment appréhender les données radar dans le cadre de l'étude de la migration dans le golfe du Lion, au regard de ce qui est fait dans la littérature sur ce sujet (voir livrable L34). Cette démarche permet de faire émerger des problématiques et questionnements, qui serviront à nourrir la discussion entre partenaires, puis guider les choix futurs concernant les analyses formelles des données validés et définitives.

Les données pré-traitées fournies par le lot 5 MIGRALION contiennent différentes informations :

- Des variables rappelant les propriétés et réglages du radar ainsi que des filtres appliqués qui sont utiles pour garder une trace et pouvoir faire des comparaisons entre études.
- Temporelles : heure exacte du relevé. Heure du lever/coucher du soleil le jour du relevé. Informations sur le temps d'enregistrement effectif par le radar (période de blind, pannes etc). Ces données sont indispensables pour standardiser par l'effort.
- Spatiales : par site avec les coordonnées géographiques en x et y.
- Écologiques : assignation à une catégorie type d'oiseaux (et probabilité associée)
- Quantitatives : hauteur, direction et vitesse de vol de la cible
- Le MTR (Migration Traffic Rate) par heure et tranche d'altitude

L'assignation à une catégorie "type d'oiseaux" se fait par utilisation d'un algorithme développé spécialement pour les échos récoltés par radars BirdScan (Schmid *et al.*, 2019). L'estimation de la taille et du type de vol d'un oiseau se base sur la fréquence des battements d'ailes déduite du signal d'écho. Dans les données disponibles à ce jour huit classes sont distinguées : nuée (groupe d'oiseaux proches), gros oiseaux, limicoles, type martinets, passereau, petit passereau, grand passereau, non identifié.

Le MTR (Migration Traffic Rate) est une unité standard pour quantifier l'activité de vol des oiseaux, utilisée pour comparer les résultats de différents systèmes radar (Nilsson *et al.*, 2018). Il est mesuré comme étant le nombre d'oiseaux traversant une ligne de 1 km à la verticale de la direction de vol au cours d'une heure dans un intervalle d'altitude défini. A noter que l'estimation de la MTR nécessite une information du volume étudié, qui dépend des propriétés du radar et de la section transversale radar de la cible (Schmid *et al.*, 2019).

3.2.2 Variabilité spatiales et temporelles du nombre d'échos

Comme représenté sur les histogrammes de la figure 4, le nombre de cible enregistrées évolue au cours de l'année mais également au cours de la journée/nuit. On note des différences fortes également entre sites. Deux difficultés sont relevées à ce stade :

- Tandis que le radar fixe enregistre en continu sur l'année, le radar mobile nous apporte des informations par site sur seulement certaines fenêtres de temps, ce qui nécessitera un calibrage entre radars si l'on veut pouvoir comparer leurs données. Une solution pour cela sera d'inclure dans le modèle en variables explicatives conjointement la localisation et la date du relevé.

- L'heure de coucher du soleil varie au cours de l'année. De nombreuses études ont montré que la lumière joue un rôle primordial pour le départ en migration (Abbot *et al.*, 2023 ; Archibald *et al.*, 2017). Il sera intéressant d'essayer d'intégrer cette variation saisonnière dans les modèles, par exemple en utilisant un indice de l'heure du relevé en fonction de l'heure du coucher du soleil. Néanmoins, cela pourrait poser des difficultés dans la mesure d'une périodicité sur la journée, qui est une variable de nature circulaire.

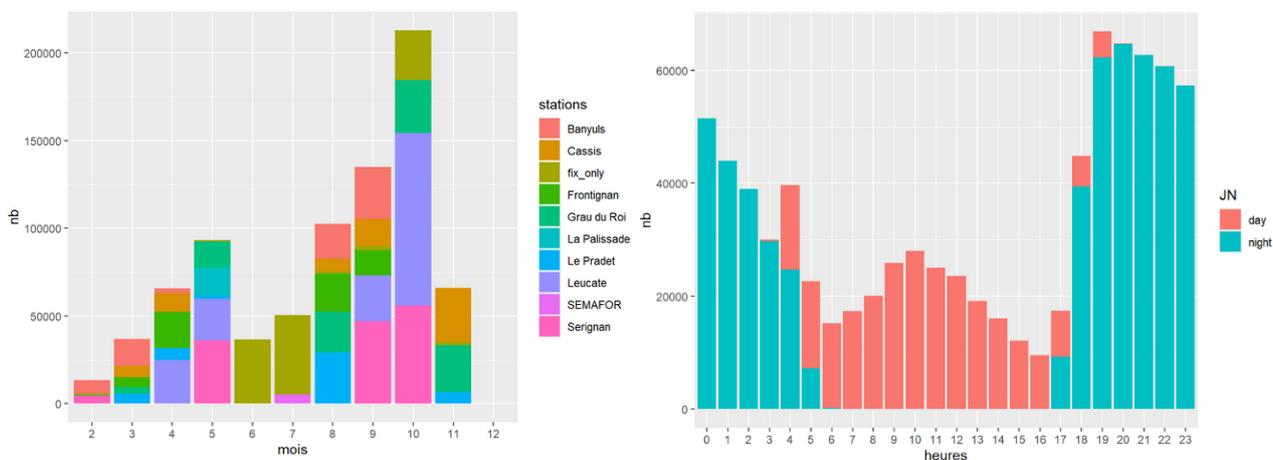


Figure 4 : RESULTATS PRELIMINAIRES : NOMBRE DE CIBLES ENREGISTRÉES ET CLASSÉES PAR MOIS (À GAUCHE) ET PAR HEURE (À DROITE). SUR L'HISTOGRAMME DE GAUCHE LES CIBLES SONT ASSIGNÉES AU SITE SUR LEQUEL ELLES ONT ÉTÉ ENREGISTRÉES (COULEURS), TANDIS QUE SUR CELUI DE DROITE LES CIBLES SONT CLASSÉES SELON L'HEURE DU COUCHER DU SOLEIL (JOUR EN ROUGE, NUIT EN TURQUOISE).

Par ailleurs, on observe sur la figure 4 que bien que la quantité d'échos semble plus importante la nuit, de nombreux échos ont été enregistrés la journée. On observe une augmentation du nombre d'échos autour du coucher du soleil, puis une diminution progressive en fin de nuit, comme observé dans d'autres études (Cabrera-Cruz *et al.*, 2017). Un point clef sera de déterminer dans quelle mesure ces enregistrements en journée comprennent des oiseaux en migration et non pas seulement des oiseaux résidents localement.

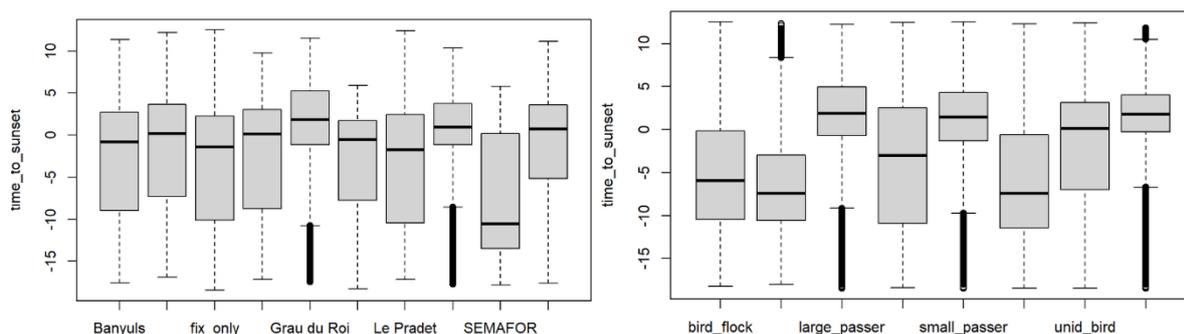


Figure 5 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DIFFÉRENCE ENTRE L'HEURE DE COUCHER DU SOLEIL ET L'HEURE DE RELEVÉ, PAR LOCALISATION (GAUCHE) ET TYPE D'OISEAUX (À DROITE).

La figure 5 suggère que le patron journalier est probablement différent selon le site, et selon les espèces considérées. On peut émettre l'hypothèse que la stratégie de déplacement diffère entre les oiseaux traversant

tout droit la Méditerranée, depuis la Camargue par exemple, et ceux suivant la côte (Becciu *et al.*, 2019). De la même façon, les caractéristiques de vol des différents types d'oiseaux peuvent induire des phénologies différentes (La sorte *et al.*, 2015). Il sera alors intéressant de creuser ces questions avec l'ensemble du jeu de données. Les résultats bruts des suivis par télémétrie suggèrent que si l'on observe effectivement une forte variabilité de stratégies entre espèces, la variabilité au sein d'une même espèce n'est pas à négliger. En effet, il est très probable que selon le moment du déplacement, qui peut être lié notamment au statut reproducteur de l'individu, le choix du trajet diffère fortement. De la même façon qu'il a été observé que des individus peuvent utiliser des routes très différentes à l'aller et au retour (Mellone *et al.*, 2013).

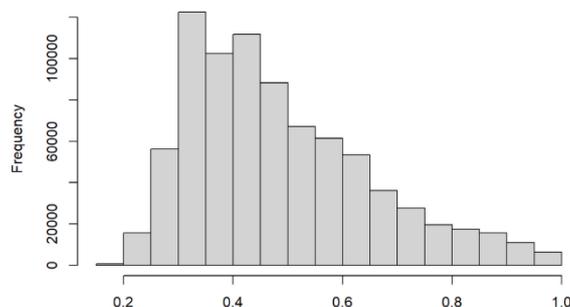


Figure 6 : RESULTATS PRELIMINAIRES : FRÉQUENCE DE PROBABILITÉS D’ASSIGNATION À LA CLASSE PAR LES RADARS À LA CÔTE.

Comme l’illustre la figure 6, à ce stade, les probabilités d’assignation à un type d’oiseaux sont relativement basses, ce qui suggère une incertitude forte quant à la classification. Par ailleurs, pour le moment, il n’existe pas de classe pour les chauves-souris, qui sont probablement regroupées avec les petits passereaux. Ces dernières représentent cependant probablement une proportion très faible des cibles. A noter que cette classification sera probablement améliorée grâce aux nouveaux algorithmes en cours de développement. Enfin, la catégorie “bird_flock” qui correspond aux groupes d’oiseaux soulève un certain nombre d’interrogations, car nous ignorons le nombre et le type d’oiseaux que le groupe contient. Les interprétations des résultats concernant ces types devront donc être considérées avec précautions.

3.2.3 Intensité de migration et définition de périodes de migration

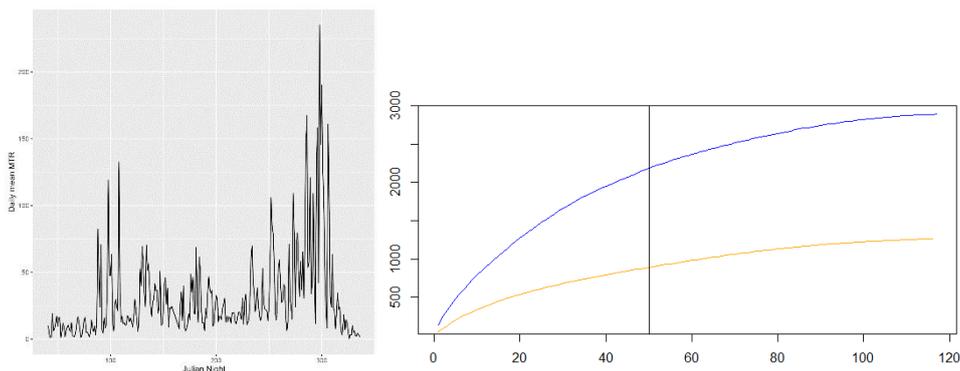


Figure 7 : RESULTATS PRELIMINAIRES : ÉVOLUTION DU MTR MOYEN PAR NUIT AU COURS DE L’ANNÉE (À GAUCHE) ET EN SOMME CUMULÉE ORDONNÉE (À DROITE, EN BLEU MTR DE NUIT ET EN ORANGE MTR DE JOUR).

La migration dans le golfe du Lion est définie pour cette zone en deux périodes pré et post-nuptiale. Néanmoins, comme l'illustre la figure 7, le passage des oiseaux en migration n'a pas lieu de façon homogène au cours de ces deux périodes. Comme c'est le cas dans la plupart des études (Hirschhofer *et al.*, 2024), on observe des pics migratoires, probablement en lien avec les conditions météo locales et notamment l'arrivée prochaine de pluie (Shamoun-Baranes *et al.*, 2017 ; Stark *et al.*, 2019). Il sera intéressant de tester un éventuel effet de la distance entre sites sur l'autocorrélation temporelle entre pics migratoires, autrement dit, voir si des sites proches dans l'espace sont plus synchrones.

Il existe différentes approches pour définir les périodes de migrations, selon si l'on considère seulement l'intensité du MTR ou également la concentration des directions (Hirschhofer *et al.*, 2024). Toutes les métriques calculées par saisons de migration dépendent de la définition des dates de début et fin. La figure 8 illustre dans quelle mesure ces dates sont variables dans notre cas selon le filtrage appliqué aux données (échos de nuit au radar fixe et échos de nuit au niveau des deux radars), pour ce qui est de la migration d'automne uniquement.

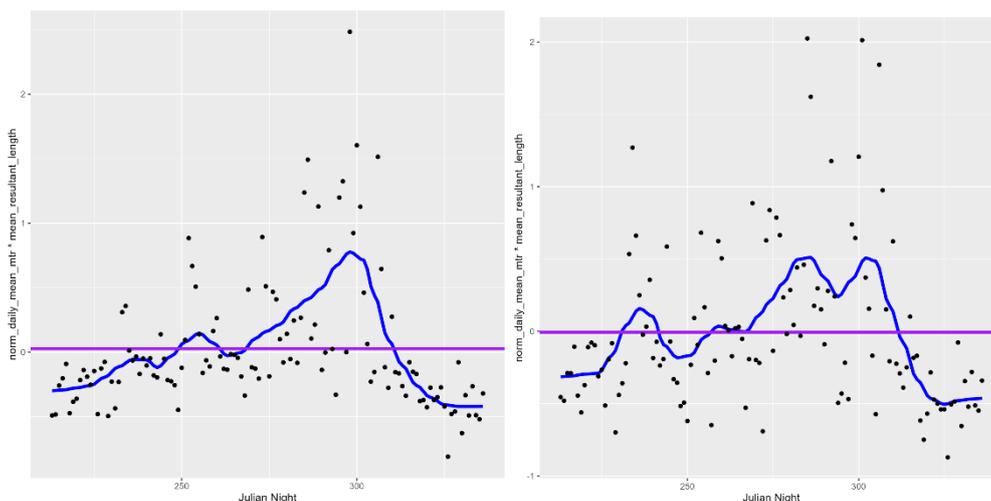


Figure 8 : RESULTATS PRELIMINAIRES : INDEX MIGRATOIRE (MTR MOYEN PAR NUIT * VECTEUR DE RÉSULTANTE MOYENNE DES DIRECTIONS PAR NUIT) AU COURS DES NUITS EN AUTOMNE. LA LIGNE VIOLETTE REPRÉSENTE LA VALEUR MOYENNE DE L'INDEX, ET LA COURBE BLEUE UNE COURBE LOESS (FAMILLE GAUSSIENNE).

3.2.4 Hauteurs de vol

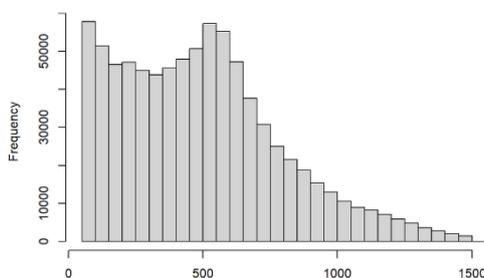


Figure 9 : RESULTATS PRELIMINAIRES : FRÉQUENCE DU NOMBRE D'ÉCHOS SELON L'ALTITUDE.

Une des limites principales des données radar porte sur la méconnaissance des biais de détection avec la distance et la hauteur des oiseaux (Zaugg *et al.*, 2018 ; Schmaljohann *et al.*, 2008 ; Nilsson *et al.*, 2018 ; Schmid *et al.*, 2019). En effet, il a été mesuré que des petits oiseaux sont détectés jusqu'à environ 800-1000 m de hauteur tandis que les gros oiseaux peuvent être détectés plus haut, jusqu'à environ 1500m. Par ailleurs, le radar ne détecte pas de cibles en dessous de 50m d'altitude. On observe en effet une diminution brusque du nombre d'échos à partir de 600-700m sur l'histogramme 9, néanmoins il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure ceci traduit une réalité biologique (hauteur de vol préférentielle) ou des conséquences de la diminution de la détection avec l'altitude. **Les cibles renseignent alors à priori des effectifs minimums.** Certaines études d'Europe du Nord modélisent cette détection via des modèles de distance sampling (Welcker *et al.*, 2019 ; Huppopp *et al.*, 2006), néanmoins ces approches ne sont à priori pas applicables pour les radars BirdScan.

A noter que dans notre cas d'étude en contexte éolien, les altitudes qui nous intéressent le plus sont celles correspondant aux hauteurs de pales, c'est à dire entre 50m et 300m, qui correspondent à des altitudes où la détection par les radars est plutôt bonne. Néanmoins, les radars étant placés sur la terre, nous ignorons dans quelles mesures les altitudes mesurées ici correspondent à celles des mêmes cibles plus loin en mer sur leur trajet au niveau des futurs parcs. Pour les grosses espèces ceci pourra être en partie vérifié par les données GPS.

Par ailleurs, certains articles en Europe du Nord ont pu mettre en évidence que les nuits de fortes migrations les oiseaux volent plus haut. Il sera intéressant de voir si l'on retrouve ce résultat au niveau du golfe du Lion. Une diminution de l'altitude au cours de la nuit a également souvent été observée, suggérant que les migrants se posent le matin ou changent de comportement pour s'alimenter plus près du sol (Cabrera-Cruz *et al.*, 2017).

3.2.5 Directions de vol

Les figures 10 et 11 montrent la distribution des directions mesurées pour l'ensemble des cibles détectées par site sur l'ensemble de la période (jour et nuit). On note une forte variabilité entre sites, tant en termes de nombre d'échos que de direction moyenne. Comme attendu, des premiers modèles linéaires généralisés que nous avons testés sur ces données suggèrent un effet de la longitude sur ces directions, néanmoins ces résultats sont à confirmer par des modèles plus fins permettant de coupler les aspects spatiaux et temporels. A noter que la corrélation entre les x et les y des différents sites est très forte ($\rho=0.82$) et ces derniers sont presque alignés en y, ce qui aura des conséquences sur le choix des variables à inclure dans les modèles. Une possibilité serait d'utiliser la longitude uniquement.

Les histogrammes de la figure 12 attirent notre attention sur de potentiels biais d'échantillonnage, qu'il ne sera néanmoins probablement pas possible d'estimer précisément. Les cibles pour lesquelles les données de directions ne peuvent être calculées ne sont pas réparties de façon totalement aléatoire dans le jeu de données, en effet certaines catégories d'oiseaux semblent plus concernées, et cette proportion augmente lorsque les altitudes sont extrêmes (très basses ou très hautes).

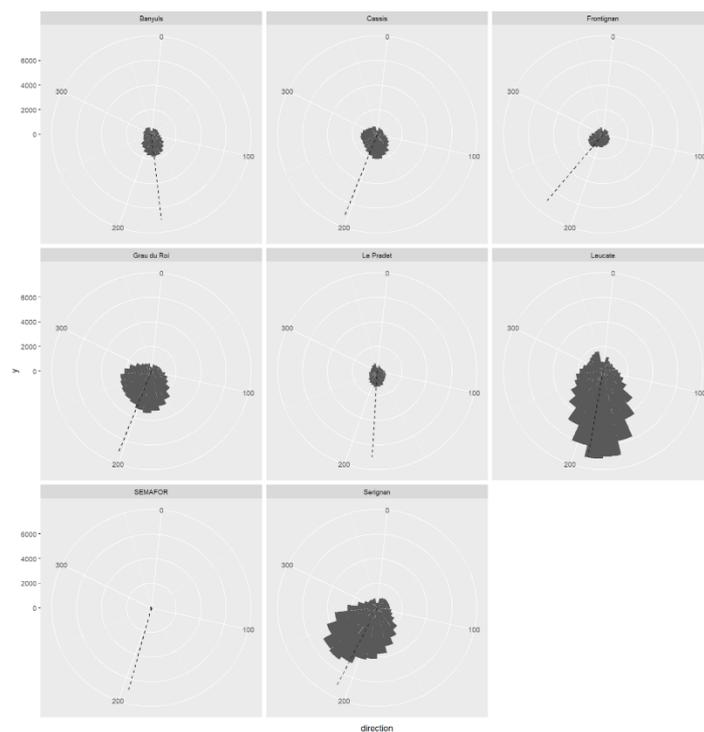


Figure 10 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE VOL MESURÉES PAR CIBLES POUR CHACUN DES SITES (PANELS) DURANT LA PÉRIODE DE MIGRATION PRÉ-NUPTIALE 2022. EN POINTILLÉ EST REPRÉSENTÉE LA DIRECTION MOYENNE PAR SITE.

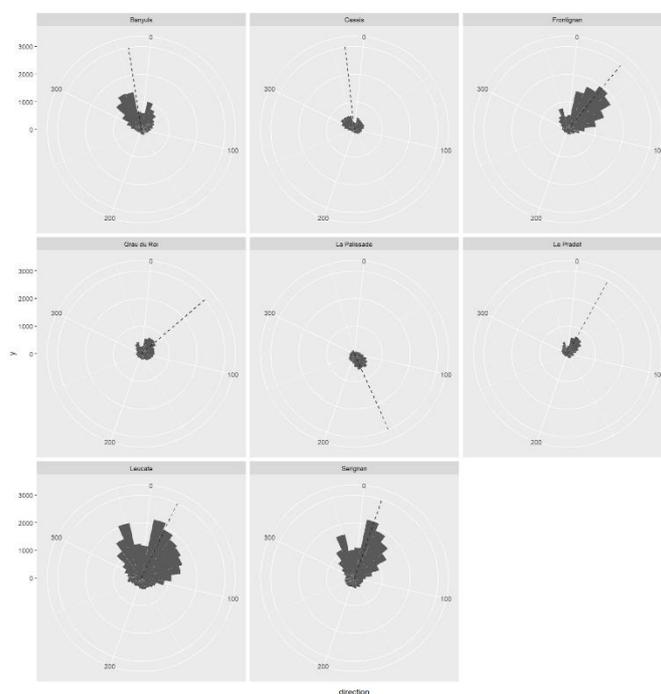


Figure 11 : RESULTATS PRELIMINAIRES : DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE VOL MESURÉES PAR CIBLES POUR CHACUN DES SITES (PANELS) DURANT LA PÉRIODE DE MIGRATION POST-NUPTIALE 2022. EN POINTILLÉ EST REPRÉSENTÉE LA DIRECTION MOYENNE PAR SITE.

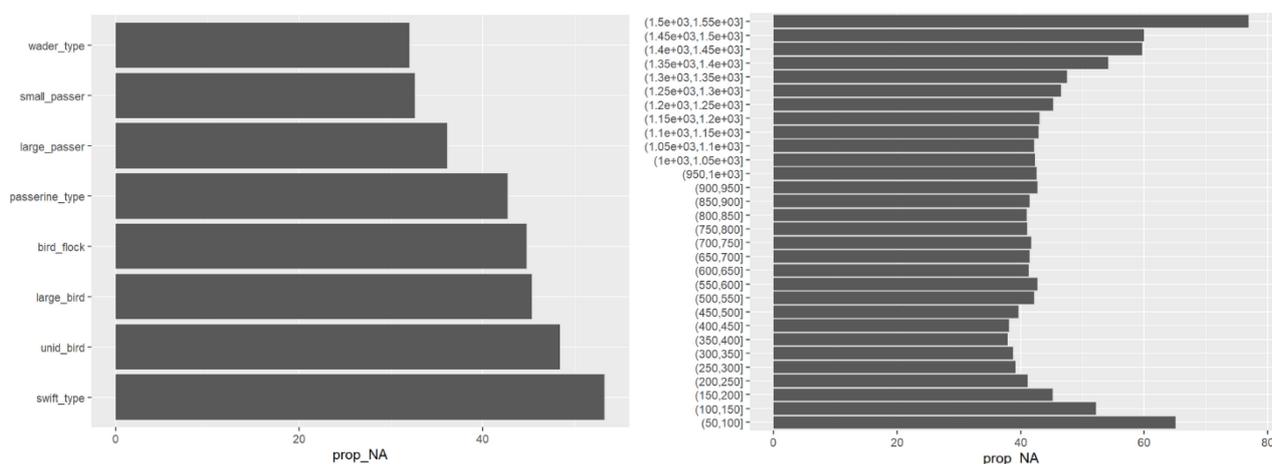


Figure 12 : RESULTATS PRELIMINAIRES : PROPORTION DE VALEURS DE DIRECTIONS MANQUANTES SELON LE TYPE D'OISEAUX (À GAUCHE) ET LA TRANCHE ALTITUDINALE (À DROITE).

Références bibliographiques

- Abbott, A. L., Deng, Y., Badwey, K., Farnsworth, A. and Horton, K. G. (2023). Inbound arrivals: using weather surveillance radar to quantify the diurnal timing of spring trans-Gulf bird migration. *Ecography* 2023: e06644.
- Archibald, K. M., Buler, J. J., Smolinsky, J. A. and Smith, R. J. (2017). Migrating birds reorient toward land at dawn over the Great Lakes, USA. *The Auk* 134: 193–201.
- Arnold, T. W., Clark, R. G., Koons, D. N., & Schaub, M. (2018). Integrated population models facilitate ecological understanding and improved management decisions. *The Journal of Wildlife Management* 82: 266–274.
- Becciu, P., Menz, M. H. M., Aurbach, A., Cabrera-Cruz, S. A., Wainwright, C. E., Scacco, M., Ciach, M., Petterson, L. B., Maggini, I., Arroyo, G. M., Buler, J. J., Reynolds, D. R. and Sapir, N. (2019). Environmental effects on flying migrants revealed by radar. - *Ecography* 42: 942–955.
- Cabrera-Cruz, S. A., Mabee, T. J. and Villegas-Patracá, R. (2017). Patterns of nocturnal bird migration in southern Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 867–879.
- Crawford, B. A., Moore, C. T., Norton, T. M. and Maerz, J. C. (2018). Integrated analysis for population estimation, management impact evaluation, and decision-making for a declining species. *Biological Conservation* 222: 33–43.
- Fauchald, P., Ollus, V. M. S., Ballesteros, M., Breistøl, A., Christensen-Dalsgaard, S., Molværsmyr, S., Tarroux, A., Systad, G. H. and Moe, B. (2024). Mapping seabird vulnerability to offshore wind farms in Norwegian waters. *Front. Mar. Sci.* 11: 1335224.

- Hirschhofer, S., Liechti, F., Ranacher, P., Weibel, R. and Schmid, B. (2024). High-intensity bird migration along Alpine valleys calls for protective measures against anthropogenically induced avian mortality. *Remote Sens Ecol Conserv*: rse2.377.
- Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K., Fredrich, E. and Hill, R. (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148: 90–109.
- Isaac, N. J. B., Jarzyna, M. A., Keil, P., Dambly, L. I., Boersch-Supan, P. H., Browning, E., Freeman, S. N., Golding, N., Guillera-Arroita, G., Henrys, P. A., Jarvis, S., Lahoz-Monfort, J., Pagel, J., Pescott, O. L., Schmucki, R., Simmonds, E. G. and O'Hara, R. B. (2020). Data Integration for Large-Scale Models of Species Distributions. *Trends in Ecology & Evolution* 35: 56–67.
- Korner-Nievergelt, F., Prévot, C., Hahn, S., Jenni, L., & Liechti, F. (2017). The integration of mark re-encounter and tracking data to quantify migratory connectivity. *Ecological Modelling* 344: 87–94.
- La Sorte, F. A., Hochachka, W. M., Farnsworth, A., Sheldon, D., Van Doren, B. M., Fink, D. and Kelling, S. (2015). Seasonal changes in the altitudinal distribution of nocturnally migrating birds during autumn migration. *R. Soc. open sci.* 2: 150347.
- Mellone, U., López-López, P., Limiñana, R., Piasevoli, G., & Urios, V. (2013). The trans-equatorial loop migration system of Eleonora's falcon: differences in migration patterns between age classes, regions and seasons. *Journal of Avian Biology* 44: 417–426.
- Miller, D. A. W., Pacifici, K., Sanderlin, J. S., & Reich, B. J. (2019). The recent past and promising future for data integration methods to estimate species' distributions. *Methods in Ecology and Evolution* 10: 22–37.
- Nilsson, C., Dokter, A. M., Schmid, B., Scacco, M., Verlinden, L., Bäckman, J., Haase, G., Dell'Omo, G., Chapman, J. W., Leijnse, H. and Liechti, F. (2018). Field validation of radar systems for monitoring bird migration (G Siriwardena, Ed.). - *Journal of Applied Ecology* 55: 2552–2564.
- Pacifici, K., Reich, B. J., Miller, D. A., & Pease, B. S. (2019). Resolving misaligned spatial data with integrated species distribution models. *Ecology* 100: e02709.
- Renner, I. W., Louvrier, J., & Gimenez, O. (2019). Combining multiple data sources in species distribution models while accounting for spatial dependence and overfitting with combined penalized likelihood maximization. *Methods in Ecology and Evolution* 10: 2118-2128.
- Riecke, T. V., Williams, P. J., Behnke, T. L., Gibson, D., Leach, A. G., Sedinger, B. S., Street, P. A. and Sedinger, J. S. (2019). Integrated population models: Model assumptions and inference (R Freckleton, Ed.). - *Methods Ecol Evol* 10: 1072–1082.
- Schmaljohann, H., Liechti, F., Bächler, E., Steuri, T. and Bruderer, B. (2008). Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis* 150: 342–355.
- Schmid, B., Zaugg, S., Votier, S. C., Chapman, J. W., Boos, M. and Liechti, F. (2019). Size matters in quantitative radar monitoring of animal migration: estimating monitored volume from wingbeat frequency. *Ecography* 42: 931–941.

- Schmidt, M., Aschwanden, J., Liechti, F., Wichmann, G., & Nemeth, E. (2017). Comparison of visual bird migration counts with radar estimates. *Ibis* 159: 491–497.
- Shamoun-Baranes, J., Liechti, F. and Vansteelant, W. M. G. (2017). Atmospheric conditions create freeways, detours and tailbacks for migrating birds. *J Comp Physiol A* 203: 509–529.
- Shiple, J. R., Kelly, J. F., & Frick, W. F. (2018). Toward integrating citizen science and radar data for migrant bird conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 4: 127–136.
- Stark, H., Liechti, F., Njokikanuri, T., & Pearson, D. (2019). Temporal and spatial distribution, and flight directions of migratory birds in Tsavo West National Park, Kenya: a comparison of radar and ringing data. *Scopus: Journal of East African Ornithology* 39: 1–21.
- Weisshaupt, N., Lehtiniemi, T., & Koistinen, J. (2021). Combining citizen science and weather radar data to study large-scale bird movements.
- Welcker, J., BioConsult, S. H., & KG, C. (2019). Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. Technical report. BioConsult SH, Husum, 3.
- Wills, G. V. Monitoring Avian Migration with Dedicated Vertical-looking Radar. (2017). Thèse de doctorat. University of Exeter (United Kingdom).
- Zaugg, S., Saporta, G., Van Loon, E., Schmaljohann, H. and Liechti, F. (2008). Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping. *J. R. Soc. Interface*. 5: 1041–1053.
- Zhu, Q., Hobson, K. A., Zhao, Q., Zhou, Y., Damba, I., Batbayar, N., ... & David Fox, A. (2020). Migratory connectivity of Swan Geese based on species' distribution models, feather stable isotope assignment and satellite tracking. *Diversity and Distributions* 26: 944–957.
- Zipkin, E. F. and Saunders, S. P. (2018). Synthesizing multiple data types for biological conservation using integrated population models. *Biological Conservation* 217: 240–250.