RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

MIGRALION

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

Rapport final

Lot 3 « Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins »
Livrable L19

Mai 2025

Partenaires scientifiques et techniques

Financeurs du programme

Programme financé par l'Office français de la biodiversité (OFB), la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB), la région Occitanie et la région Sud

SUIVI DU DOCUMENT

Auteur.e.s	CHAMPAGNON, J., COURBIN N., DUFOUR P., TILLO S., DENOUAL L., GREMILLET D., JIGUET F., DURIEZ O.	*Tour du Valat, institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes* *CEFE, University of Montpellier, CNRS, EPHE, IRD* *UMR7204 Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation MNHN-CNRS-Sorbonne Université*
Coordinateurs scientifiques et techniques du projet	Yann PLANQUE Aurélien BESNARD	France Énergies Marines (FEM) Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) – EPHE
Pilotage du projet	Constance AUDIFFREN	Office Français de la Biodiversité (OFB)
Titre du document	MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : Rapport final d'analyses du Lot 3 « Télémétrie, migrateurs terrestres et oiseaux marins ». Livrable L19.	
Statut du document	Version 2, corrections	
Date de sauvegarde	28/05/2025	
Date de diffusion	27/10/2025	
Version du document	VF	
Nom du fichier	MIGRALION_L19_Lot3 _Rapport_final_2025-05_V2.pdf	
Nombre de pages	168 pages	
Niveau de diffusion	Public	

HISTORIQUE DES CHANGEMENTS

Version	Date	Modifié par	Modifications / Sections
1	26/05/2025	CHAMPAGNON, J., COURBIN N., DUFOUR P., TILLO S., DENOUAL L., GREMILLET D., JIGUET F., DURIEZ O.	Rédaction du document initial
2	10/09/2025		Corrections dans l'ensemble du document à la suite des relectures OFB/DGEC/DEB/DREAL

APPROBATION

Version	Date	Approuvé par	Titre
Finale	28/10/2025	Yann PLANQUE, FEM	Coordinateur du projet
Signature : 			
Finale	28/10/2025	Constance AUDIFFREN, OFB	Pilote du projet
 Signature :			

CITATION DU DOCUMENT / *HOW TO CITE THIS DOCUMENT*

Comment citer ce document : CHAMPAGNON, J., COURBIN N., DUFOUR P., TILLO S., DENOUAL L., GREMILLET D., JIGUET F., DURIEZ O. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : Rapport final d'analyses du Lot 3 « Télémétrie, migrateurs terrestres et oiseaux marins ». Rapport pour l'OFB. 168 PP. MIGRALION : lot 3 | Eoliennes en mer

Contexte et objectifs du programme MIGRALION

Située au carrefour de voies majeures de migration, la France joue un rôle clé dans les déplacements migratoires de l'avifaune. Le golfe du Lion (Méditerranée française) constitue notamment un espace maritime stratégique pour l'avifaune marine et l'avifaune terrestre migratrice, fréquenté ou ponctuellement survolé par des millions d'individus appartenant à de nombreuses espèces d'oiseaux — environ 300 espèces migratrices fréquentent la zone.
Cependant, un constat de déficit de connaissances sur l'avifaune en mer au niveau du golfe du Lion a été mis en évidence par la communauté scientifique, les associations naturalistes, les gestionnaires d'espaces naturels et les services de l'État. Ces lacunes de connaissances concernent à la fois l'avifaune terrestre migratrice — de nombreuses espèces peuvent passer ponctuellement en mer pendant les périodes de migration prénuptiale (Sud-Nord) et de migration postnuptiale (Nord-Sud) — et l'avifaune marine, dont les connaissances sur les zones d'utilisations du milieu marin par certaines espèces s'avéraient parcellaires ou peu documentées.

Le secteur du golfe du Lion est marqué par de multiples projets d'usage, dont notamment le développement de parcs éoliens en mer flottants. En effet, l'état français prévoit, dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), d'arriver à une puissance installée d'éoliennes en mer (posé et flottant) d'environ 45 GW à l'horizon 2050, destinée à la production d'électricité.

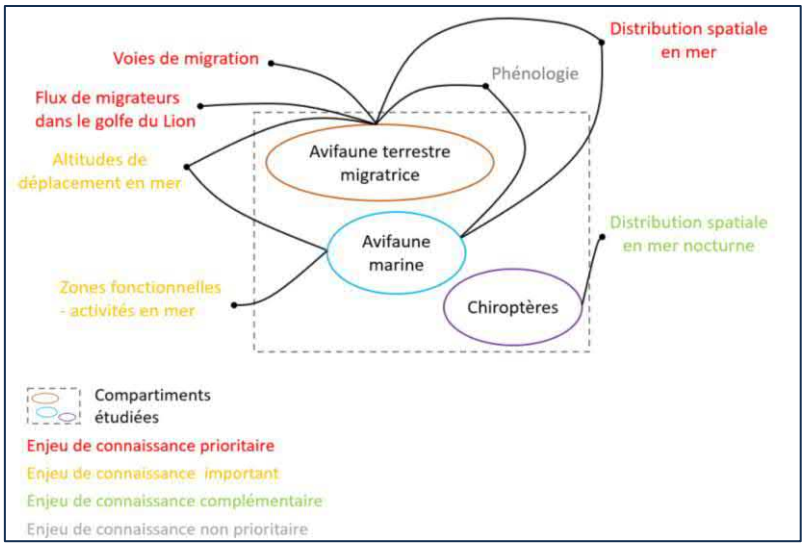
À la suite du débat public « la mer un débat », portant sur la mise à jour des volets stratégiques des documents stratégiques de façade (DSF) et la cartographie des zones maritimes et terrestres prioritaires pour l'éolien en mer, l'État a détaillé les zones de développement de l'éolien en mer. Ces éléments ont été publiés au Journal officiel de la République française du 18 octobre 2024 (https://www.legifrance.gouv.fr/download/file/Jb5GEIw-__g4nOgkwvqUCu6yplGEb0Xgie4-T-nS53g=/JOE_TEXTE).

Dans le contexte, il est apparu essentiel d'améliorer les connaissances sur les flux migratoires et les fonctionnalités des zones en mer, qu'il s'agisse d'espèces résidentes, de passage, présentes durant une partie de leur cycle biologique annuel ou ponctuellement. Cette acquisition de connaissances est cruciale pour anticiper au mieux les zones d'impact potentiel liées à ces nouveaux usages.

Un travail d'identification des enjeux liés à l'acquisition de connaissances a été mené (cf. ***Figure ci-après***). Pour y répondre, l'Office français de la biodiversité (OFB) a lancé en 2021 le programme MIGRALION, prévu pour une durée de quatre ans, dont trois années consécutives ont été consacrées à l'acquisition de données.

Les objectifs de MIGRALION sont ainsi d'acquérir des connaissances sur :

- Les espaces maritimes du golfe du Lion utilisés par les oiseaux marins ;
- Les zones de passages principales (flux les plus intenses) des oiseaux migrateurs terrestres dans le golfe du Lion ;
- Les hauteurs de vol des oiseaux marins et des oiseaux migrateurs terrestres sur cet espace maritime ;
- La phénologie des migrations en mer ;
- Les caractéristiques de vols de l'avifaune en mer.



Besoins de connaissance identifiés avant la mise en place de MIGRALION sur les compartiments « avifaune terrestre migratrice », « avifaune marine » et « chiroptères », et hiérarchisation de ces enjeux de connaissance

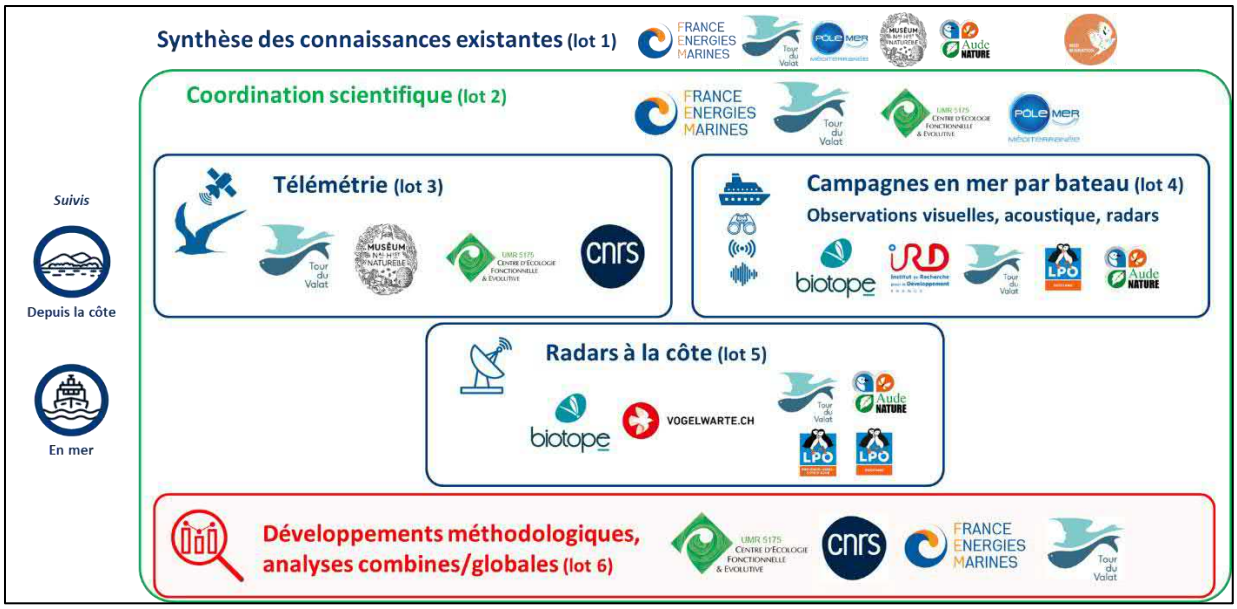
MIGRALION s'appuie sur une large diversité de moyens humains et techniques, mobilisés pour acquérir ces nouvelles connaissances : observations visuelles à terre, baguage, suivis télémétriques, campagnes en mer (observations visuelles, radars embarqués et acoustique), ainsi que suivis par radars ornithologiques à la côte. La plus-value du programme réside également dans la combinaison de ces jeux de données et dans une analyse intégrée globale, afin de répondre aux questions scientifiques.

Ce programme est structuré autour de six lots, dont un d'état de l'art des connaissances préalables (lot 1), un de coordination (lot 2), trois consacrés à l'acquisition des données (lots 3 à 5) et un dédié à l'analyse globale (lot 6) :

- **Lot n°1** : Synthèse bibliographique, recensement de données, gestion de l'accessibilité des données
- **Lot n°2** : Coordination, expertise et dissémination des résultats du programme
- **Lot n°3** : Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins
- **Lot n°4** : Campagnes en mer par bateau
- **Lot n°5** : Radar s ornithologique s à la côte
- **Lot n°6** : Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets.

Chaque lot du programme a fait office d'un marché public ouvert par l'OFB. La mise en œuvre des actions de chaque lot a reposé sur la réalisation de différents livrables, tout au long du programme.

Le consortium qui a été retenu pour mettre en place les actions du programme projet est présenté schématiquement dans la ***Figure ci-après***. Il est composé de laboratoires d'instituts de recherche, de bureaux d'études ainsi que d'associations naturalistes, experts sur les thématiques adressées.



Composition du consortium du programme MIGRALION (2021-2025)

MIGRALION est ainsi un programme inédit, par l'ampleur des jeux de données acquis sur l'avifaune en mer, dans le golfe du Lion. Pour la première fois en France, et plus particulièrement dans le golfe du Lion, des méthodes de suivis complémentaires de l'avifaune ont été mises en œuvre sur **plusieurs années consécutives**, puis **les données ont été combinées pour une analyse intégrée**. L'objectif de cette acquisition de connaissances est d'éclairer la mise en œuvre des politiques publiques de préservation des espèces et de leurs habitats naturels, afin de mieux évaluer et encadrer les interactions entre ces espèces et les activités humaines.

L'ensemble des livrables, ainsi que les jeux de données brutes et prétraitées, ont vocation à être rendus publics.

Le budget total pour la réalisation du projet est de 4,2M€.

MIGRALION est financé par l'Office français de la biodiversité (OFB), la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB), la région Occitanie et la région Sud.

Objectifs de ce rapport

Ce document correspond au **rapport final d'analyses du lot 3 « Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins » du programme MIGRALION**, et constitue le livrable L19 du cahier des clauses techniques particulières (CCTP) du programme. Il présente l'ensemble des **résultats finaux acquis par le lot 3 du programme MIGRALION**, obtenus à l'issue de quatre années du programme (2021 – 2025), incluant trois années consécutives d'acquisition des données.

Il s'intègre dans une série de quatre rapports finaux de présentation des résultats de MIGRALION (un rapport par lot d'acquisition des données ou d'analyse globale des données) :

- CHAMPAGNON, J., COURBIN N., DUFOUR P., TILLO S., DENOUAL L., GREMILLET D., JIGUET F., DURIEZ O. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires **: Rapport final d'analyses du Lot 3 « Télémétrie, migrateurs terrestres et oiseaux marins ».** Rapport pour l'OFB. 168 PP MIGRALION : lot 3 | Eoliennes en mer

- ASSALI, C., DELCOURT, V., DELELIS, N. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : **Rapport final d'analyses du Lot 4 « Campagnes en mer par bateau »**. Rapport pour l'OFB 331 PP. MIGRALION : lot 4 | Eoliennes en mer

- DELCOURT, V., SCHOPPER, H., SCHMID, B., HAMON, A., ASSALI, C., DAÏDÉ, C. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : **Rapport final d'analyses du Lot 5 « Radars ornithologiques à la côte »**. Rapport pour l'OFB. 123 PP. MIGRALION : lot 5 | Eoliennes en mer

- CANONNE, C., QUEROUE, M., ROQUES, S., LAURET, V., SCHROLL, L., CAT, V., COURBIN, N., PLANQUE, Y., CHAMPAGNON, J., DURIEZ, O., BESNARD, A. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : **Rapport final du Lot 6 « Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets »**. *Rapport pour l'OFB*. 169 PP. MIGRALION : lot 6 | Eoliennes en mer

Une synthèse de l'ensemble de ces rapports finaux, construite sur la base des résumés (en français) et des abstracts (en anglais) des rapports finaux des lots d'acquisition des données (lots 3, 4 et 5) et du lot d'analyses globales (lot 6), et présentant une synthèse des actions de valorisation, est également disponible :

- Consortium MIGRALION et Office Français de la Biodiversité. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : Rapport de synthèse final / Final Synthesis Report. 100 PP. MIGRALION : Synthèse finale | Eoliennes en mer MIGRALION | Eoliennes en mer

Le programme MIGRALION est également valorisé à travers des **rapports bibliographiques** préalablement réalisés par le lot 1 « Synthèse bibliographique, recensement de données, gestion de l'accessibilité des données »**,** et des **outils de communication des résultats finaux** produits par le lot 2 « Coordination, expertise et dissémination des résultats du programme » :

- BON, C., DE GRISSAC, S., GIRARD, T. 2021. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires. **Rapport final lot 1 : « Rapport sur l'état des connaissances de la faune volante dans le golfe du Lion »**. *Rapport pour l'OFB*. 111 PP. MIGRALION | Synthèse bibliographique
- DEYNA, C., CHAMPAGNON, J. 2021. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires. **Rapport final lot 1 : « Rapport du recensement et analyse des données non traitées et non publiées sur la faune volante migratrice en méditerranée française »**. *Rapport pour l'OFB*. 25 PP. MIGRALION | Rapport recensement données
- PLANQUE, Y., AUDIFFREN, C., ASSALI, C., BESNARD, A., BON, C., CANONNE, C., CAT, V., CHAMPAGNON, J., CHATEAUGIRON, T., COURBIN, N., DAÏDE, C., DEFRANCESCHI, C., DELELIS, N., DE GRISSAC, S., DELCOURT, V., DENOUAL, L., DRAGONNET, T., DUFOUR, P., DURIEZ, O., FRETIN, M., GAILLY, V., GREMILLET, D., HERMELOUP, C., HERROUIN, G., JEANNIN, B., JIGUET, F., LAURET, V., LECORPS, F., LIEBAULT, V., PREVOT, J., QUEROUE, M., REY, F., ROQUES, S., ROUSSEAU, R., SAEZ, J., SCHMID, B., SCHROLL, L., TILLO, S. 2025. **MIGRALION – A large-scale research programme on the flying fauna of the Gulf of Lion (Mediterranean Sea, France). A series of five scientific posters presenting the main results**. 8th Conference on Wind energy & Wildlife impacts (CWW), Montpellier, France. 8-12 September 2025. Posters disponibles en ligne MIGRALION : Lot 2 - Posters | Eoliennes en mer

Ces livrables ont été remis par le consortium à l'Office Français de la Biodiversité (OFB), maître d'œuvre du programme. Ils ont été relus par l'OFB, la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) et la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Occitanie, puis validés par l'OFB.

Résumé étendu – Lot 3 « Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins »

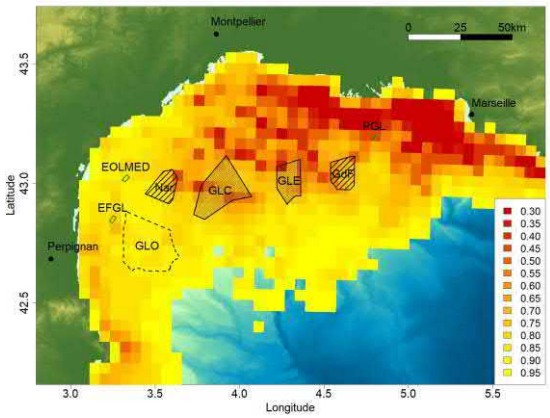
Pour répondre aux enjeux du programme MIGRALION, la télémétrie, objet du lot 3, consiste à équiper des oiseaux de balises de géolocalisation miniaturisées. Ces instruments permettent d'obtenir des données de déplacements individuels des oiseaux marins et migrateurs terrestres lors de leurs passages dans le golfe du Lion. 40 espèces ont été équipées : 3 espèces marines, 12 espèces de zones humides, 25 migrateurs terrestres dont 3 espèces de rapaces et 17 passereaux. Les 3 espèces d'oiseaux marins et les 19 espèces d'oiseaux terrestres de plus de 75 g ont été équipées avec des GPS-GSM permettant une fréquence d'acquisition élevée et un transfert des données via le réseau téléphonique sans avoir besoin de recapturer les individus. Ces balises sont équipées de batteries alimentées par l'énergie solaire grâce à des panneaux, et collectent des positions à des intervalles pouvant varier entre 5 minutes et 1 heure selon le niveau de charge de la batterie. Pour les 18 petits oiseaux migrateurs, le suivi de ces espèces a reposé sur l'utilisation de géolocalisateurs (GLS) qui stockent des informations de lumière, de pression atmosphérique et d'activité de l'oiseau qui, après analyse, permettent d'identifier les phases de vol actif de migration au-dessus de la mer Méditerranée et les hauteurs de vol. Ces informations sont obtenues par la recapture du même individu après sa migration.

Entre 2021 et 2024, 824 individus au total ont été équipés. Des données issues d'autres programmes télémétriques ont complété ce jeu de données. Compte tenu que certains oiseaux n'ont pas transmis suffisamment de données pertinentes, les données de 673 individus issus de 41 espèces ont été analysées et les résultats présentés ci-après.

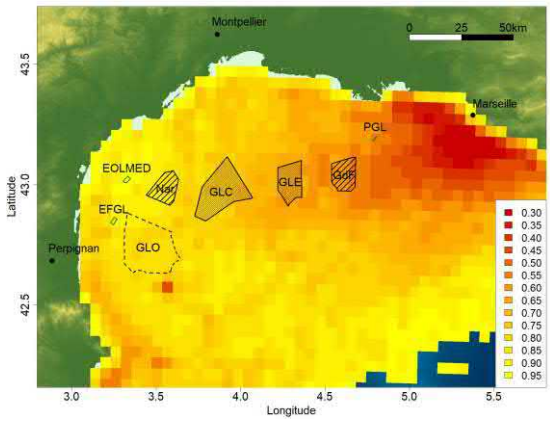
Oiseaux marins

Les résultats issus de 269 individus d'oiseaux marins équipés de balises GPS soulignent un chevauchement spatial significatif entre l'aire utilisée par les puffins yelkouan et les puffins de Scopoli avec les fermes pilotes d'éoliennes flottantes et les futures zones dédiées au développement de l'éolien flottant. La sterne caugek est plus côtière et sera probablement en interaction avec les éoliennes pilote mais peu avec les futures zones identifiées. Par ailleurs, la zone au large du golfe de Fos, du delta du Rhône et de la Camargue sont largement utilisées par les trois espèces étudiées ici, et représentent des zones de conflits potentiels importants pour la conservation de ces espèces. Selon la réaction des oiseaux, la perte d'habitats fonctionnels pourrait être majeure. Il est indispensable de poursuivre le suivi télémétrique post-installation des éoliennes pilotes pour étudier la réaction des oiseaux suite à l'implantation des parcs éoliens en mer.

A



B



C

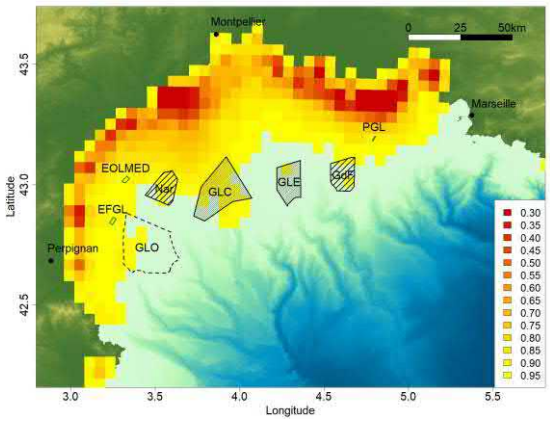


Figure A. Distribution d'utilisation (UD) (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek dans le golfe du Lion.

Les conditions marines influent peu sur la distribution des hauteurs de vol des oiseaux marins étudiés, bien que nous ayons trouvé des effets significatifs de la vitesse du vent et de la hauteur des vagues sur les hauteurs de vol. Les puffins yelkouan et les puffins de Scopoli volent 95% de leur temps en-dessous de 3 m, soit en dessous des pâles de éoliennes, quelles que soient les conditions de vitesse de vent (et de vagues), indépendamment de la direction relative du vent. Le risque de collision est quasi nul pour ces espèces. En revanche, les sternes volent plus fréquemment à hauteur de pâles des éoliennes (17% de leur temps au-dessus de 22 m) et sont potentiellement exposées au risque de collision. Il est nécessaire d'étudier en détail le comportement des sternes à proximité des éoliennes, qui pourraient de surcroît être attirées par ces structures marines pour s'y reposer.

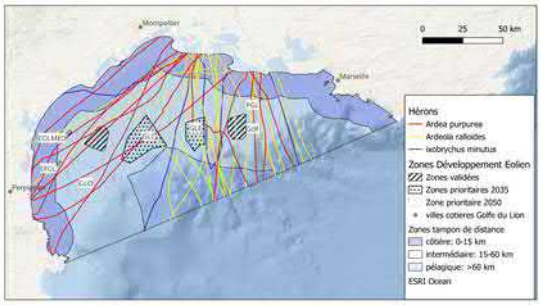
Oiseaux terrestres

Suivis par GPS

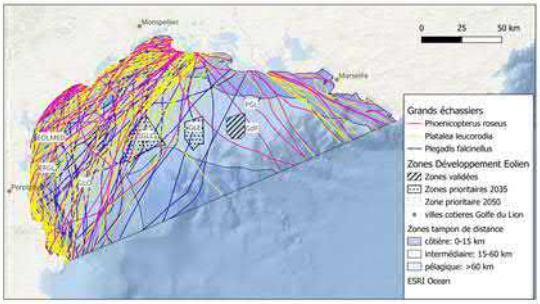
589 oiseaux migrateurs terrestres de grande taille ont été équipés de GPS dans le cadre de MIGRALION ou par des partenaires. La proportion de survols du golfe du Lion par espèce était en moyenne de 74%, avec des variations entre 33% de survols pour le coucou-geai (n=24 individus), et 100% de survols pour

le crabier chevelu (n=18), la glaréole à collier (n=4), l'avocette élégante (n=13) et la tourterelle des bois (n=15). Différentes stratégies ont été mises en évidence pour traverser le golfe du Lion. En migration postnuptiale, 51% des individus partent au Sud en pleine mer. Cela concerne en particulier le crabier chevelu, le pluvier guignard, la glaréole à collier, le goéland railleur et le rollier d'Europe. 29% des vols coupent le golfe du Lion en diagonale de la Camargue vers l'Espagne. Cette stratégie concerne principalement les mouettes rieuses, les sternes hansel et les ibis falcinelles. Enfin, 15 % des vols sont le long de la côte telles que les mouettes mélanocéphales. Lors de la migration prénuptiale, moins de données ont été recueillies, cependant, la stratégie principale de survol du golfe était la "diagonale" de l'Espagne vers la Camargue (53%), principalement pour 6 espèces dont le héron pourpré, coucou-geai, sterne hansel, ibis falcinelle, avocette élégante et tourterelle des bois. La seconde stratégie de survol direct par la mer (24%) concernait principalement le rollier, la glaréole et le goéland railleur. Enfin 22% des survols ont suivi la stratégie "longe-côte", utilisée principalement par les échasses blanches.

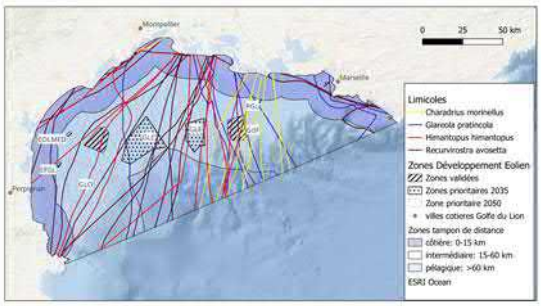
A



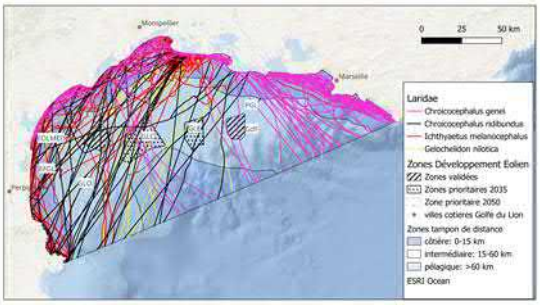
B



C



D



E

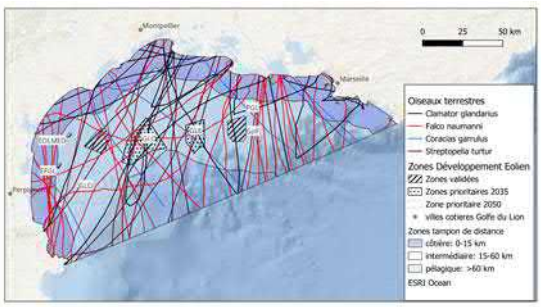


Figure B: Trajectoires de migration dans le golfe du Lion pour 5 groupes d'espèces: A. Hérons (héron pourpré, crabier chevelu, blongios nain), B. Grands echassiers (flamant rose, spatule blanche, ibis falcinelle), C. Limicoles (pluvier guignard, glaréole à collier, échasse blanche, avocette élégante), D. Larides (goéland railleur, mouette rieuse, mouette mélanocéphale, sterne hansel), E: Oiseaux terrestres (coucou-geai, faucon crécerellette, rollier d'Europe, tourterelle des bois). Les directions de vol Nord-Sud et Sud-Nord ne sont pas distinguées

Les hauteurs de survol ne sont que brièvement étudiées ici car les données ont été intégrées à la modélisation finale du lot 6. Cependant, la majorité des espèces vole en dessous de 300 m, à hauteur de pâles. L'analyse par espèce dans les zones prévues de développement de parcs éolien montre qu'en migration postnuptiale, 11 espèces ont volé sous 300 m, issues de toutes les familles. En migration prénuptiale, 9 espèces ont volé sous les 300 m (mouette rieuse, glaréole à collier, échasse blanche, flamant rose, tourterelle des bois, goéland railleur, mouette mélanocéphale, spatule blanche et ibis falcinelle).

En utilisant les données télémétriques de 121 vols migratoires postnuptiaux issues de 15 espèces de gros oiseaux équipés de GPS, il a pu être mis en évidence que les stratégies de vol au-dessus du golfe du Lion sont diverses et ne dépendent pas seulement de l'écologie ou de la morphologie de l'espèce mais également des conditions environnementales au moment du départ. Ainsi la stratégie qui consiste à voler le long de la côte à basse altitude (< 500 m) est favorisée lorsque le vent souffle de l'Est avant le départ. La stratégie qui consiste à voler vers le Sud-Est afin d'atteindre la Sardaigne ou la Tunisie est favorisée par la force du vent avant le départ. Enfin, une diminution de la température 24 heures avant le départ favorise des vols longs d'une vingtaine d'heures, directement en mer.

Suivis par géolocalisateurs

Sur les 315 appareils déployés sur 19 espèces différentes de petits oiseaux migrateurs, 66 GLS issus de 17 espèces ont pu être récupérés. Parmi tous les vols et trajectoires analysées, nous avons pu identifier 28 vols correspondant à des traversées marines de la mer Méditerranée, mais uniquement chez 8 de ces espèces. Cette répartition suggère que certaines espèces sont potentiellement plus enclines que d'autres à migrer au-dessus de la mer. C'est par exemple le cas du traquet motteux (3 individus ayant traversé la mer sur 3 GLS récupérés) ou encore du pipit rousseline (4 individus ayant traversé la mer sur 5 GLS récupérés) ou de la bergeronnette printanière (4 individus ayant traversé la mer sur 5 GLS récupérés).

Concernant l'altitude de vol, il a été observé que 10 des 28 traversées (soit 36 %) se sont déroulées à une altitude médiane inférieure à 500 mètres au-dessus du niveau de la mer. Plus précisément, les traquets motteux ont effectué leurs vols à une altitude moyenne de 112 ± 137 m (n = 5 vols), tandis que les pipits rousseline volaient en moyenne à 572 ± 455 m (n = 8 vols). Ces altitudes sont particulièrement basses comparées à celles généralement observées chez les petits migrateurs lorsqu'ils survolent la terre ou d'autres types de barrières écologiques telles que les déserts.

De plus, une tendance claire à une baisse d'altitude en journée a été mise en évidence chez les individus qui prolongeaient leur vol au-delà de la nuit. En effet, les oiseaux ayant parcouru la première partie de leur vol migratoire de nuit à une certaine altitude descendent ensuite vers des altitudes plus basses, plus proches du niveau de la mer, pour achever leur migration.

Malgré un nombre limité d'échantillons ces résultats sont uniques, en ce qu'ils offrent l'un des premiers aperçus détaillés des traversées maritimes chez de petits oiseaux migrateurs. Le fait qu'une proportion importante des vols longs en Méditerranée s'effectue à moins de 500 mètres de hauteur de vol place ces oiseaux à hauteur de pâles des éoliennes. Ce risque est particulièrement préoccupant au printemps, lorsque les oiseaux remontent vers le Nord. Si la traversée ne peut être accomplie en une seule nuit, les individus se retrouveraient alors à très basse altitude en journée, prolongeant leur vol à hauteur de pâle des éoliennes.

Conclusions

Des données inédites ont été obtenues dans le cadre du lot télémétrie de MIGRALION. Une large échelle de taille d'oiseaux a été équipé depuis les rougequeues à front blanc de 12g, aux flamants roses de plus de 4kg, afin d'obtenir des connaissances sur le franchissement de la mer Méditerranée d'une partie la plus représentative possible des oiseaux migrateurs et des oiseaux marins. Les données obtenues ont été analysées de façon plus approfondie dans le cadre du Lot 6 en complétant par des jeux de données de télémétrie additionnelles issues d'autres espèces, et en intégrant des jeux de données d'observations lors de campagnes en mer (Lot 4) ainsi que de radars à la côte (Lot 5).

Même si le jeu de données qui concerne 40 espèces reste modeste au regard d'une estimation de 300 espèces d'oiseaux migrateurs dans la région, un certain nombre d'espèces n'avaient jamais été équipées et des informations inédites ont été obtenues sur le passage en mer de celles-ci. On peut citer à titre exemple la glaréole à collier, le crabier chevelu, le pluvier guignard ou la bergeronnette printanière.

Dans le contexte d'accroissement des activités humaines en mer, notamment de l'éolien flottant, il serait pertinent d'augmenter le nombre d'espèces équipées afin d'être plus représentatif de la guilde des oiseaux migrateurs, en particulier pour les petites espèces qui sont sous représentées. Nos résultats montrent que les grands oiseaux comme les petits oiseaux migrateurs volent fréquemment dans l'emprise des pales des parcs éoliens prévus. Les données spatialisées de hauteur de vol des oiseaux de grande taille, qu'ils soient migrateurs ou marins, montrent un risque d'interactions directes (collision) ou indirectes (évitement) probables avec les projets en cours de développement. Des données spatialisées de hauteur de vol des oiseaux ayant une masse inférieure à 75g s'avèrent cruciales pour identifier les zones d'interactions de ces petits oiseaux avec les parcs éoliens en mer à venir.

Il serait particulièrement intéressant de refaire des campagnes de capture et de suivi télémétrique sur les mêmes espèces une fois le premier parc implanté pour comprendre si les oiseaux changent de comportement face à ces éléments nouveaux du paysage. La migration des oiseaux est un phénomène dynamique et les espèces peuvent rapidement changer de comportement au regard des nouveaux obstacles, changements dans la disponibilités des sites de haltes, ou modifications de variables environnementales, invalidant potentiellement dans le futur certaines conclusions énoncées ici.

Les perspectives de ce travail pourraient consister à prendre en compte les effets cumulés des parcs éoliens (GT ECUME) pour les populations d'oiseaux migrateurs en visant d'une part à quantifier le taux de mortalité induit par ces nouveaux obstacles, d'autre part d'en étudier les conséquences démographiques pour les populations tels qu'adressées par les études BIRD RISK, BIRDMOVE et BIRD DYNAMIC pour les oiseaux marins.

Extended abstract – WP3 “Telemetry tracking of terrestrial migratory birds and seabirds”

To meet the challenges of the MIGRALION program, telemetry, the subject of lot 3, involves tagging birds with miniaturized tags. These instruments enable data to be obtained on the individual movements of seabirds and terrestrial migratory birds as they pass through the Gulf of Lion. Forty species have been fitted: three marine species, 12 wetland species, and 25 terrestrial migratory species, including three species of raptors and 17 passerines. The 3 species of seabirds and 19 species of land birds weighing more than 75 g were equipped with GPS-GSM devices allowing high acquisition frequency and data transfer via the telephone network without the need to recapture the individuals. These tags are powered with solar panels and collect positions at intervals ranging from 5 minutes to 1 hour, depending on the battery charge level. For the 18 small migratory birds, tracking of these species was based on the use of geolocators (GLS) that store information on light, atmospheric pressure, and bird activity, which, after analysis, make it possible to identify the phases of active migration flight over the Mediterranean Sea and flight altitudes. This information is obtained by recapturing the same individual after its migration.

Between 2021 and 2024, a total of 824 individuals were tagged and tracked. Data from other telemetry programs supplemented this dataset. Given that some birds did not transmit sufficient relevant data, data from 673 individuals from 41 species were analysed and the results are presented below.

Seabirds

The results from 269 seabirds fitted with GPS tags highlight a significant spatial overlap between the area used by Yelkouan shearwaters and Scopoli's shearwaters with the pilot floating wind turbines and future areas dedicated to floating wind farm development. The sandwich tern is more coastal and will probably interact with the pilot wind turbines but not so much with the future areas identified. In addition, the area off the Gulf of Fos, the Rhône delta, and the Camargue are widely used by the three species studied here and represent areas of significant potential conflict for the conservation of these species. Depending on the birds' reaction, the loss of functional habitats could be significant. It is essential to continue telemetric monitoring of the pilot wind turbines after installation in order to study the birds' reaction following the establishment of offshore wind farms.

Marine conditions have little influence on the flight heights of the seabirds studied, although we found significant effects of wind speed and wave height on flight heights. Yelkouan shearwaters and Scopoli's shearwaters fly 95% of the time below 3 m, i.e. below the blades of the wind turbines, regardless of wind speed (and wave) conditions, regardless of the relative direction of the wind. The risk of collision is virtually zero for these species. In contrast, terns fly much higher (17% of the time above 22 m) and are potentially at high risk of collision. It is necessary to study in detail the behaviour of terns in the vicinity of wind turbines, which may also be attracted to these marine structures to rest.

Large terrestrial birds tracked by GPS

589 large terrestrial migratory birds were fitted with GPS devices as part of MIGRALION or by partners. The proportion of flights over the Gulf of Lion by species averaged 74%, with variations between 33% of flights for the great spotted cuckoo (n=24) and 100% of flights for the squacco heron (n=18), the

collared pratincoles (n=4), the avocet (n=13), and the turtle dove (n=15). Different strategies have been identified for crossing the Gulf of Lion. During postnuptial migration, 51% of individuals head south over the open sea. This applies in particular to the squacco heron, the dotterel, the collared pratincole, the slender-billed gull, and the European roller. Twenty-nine percent of flights cross the Gulf of Lion diagonally from the Camargue to Spain. This strategy mainly concerns black-headed gulls, gull-billed terns, and glossy ibises. Finally, 15% of flights follow the coastline, such as Mediterranean gulls. During the pre-nuptial migration, less data was collected, however, the main strategy for flying over the Gulf was the "diagonal" route from Spain to the Camargue (53%), mainly for six species including the purple heron, great spotted cuckoo, sandwich tern, glossy ibis, pied avocet, and turtle dove. The second strategy of direct flight over the sea (24%) mainly concerned the roller, the pratincole, and the slender billed gull. Finally, 22% of flights followed the "coastal" strategy, used mainly by the black-winged stilt.

Flight heights are only briefly examined here because the data were incorporated into the final modelling for Lot 6. However, most species fly below 300 m, at height of the blades. Analysis by species in the planned wind farm development areas shows that during postnuptial migration, 11 species from all families flew below 300 m. During pre-nuptial migration, nine species flew below 300 m (black-headed gull, collared pratincole, black-winged stilt, greater flamingo, turtle dove, slender-billed gull, Mediterranean gull, Eurasian spoonbill, and glossy ibis).

Using telemetry data from 121 postnuptial migratory flights of 15 species of large birds tracked with GPS, it was shown that flight strategies over the Gulf of Lion are diverse and depend not only on the ecology or morphology of the species but also on environmental conditions at the time of departure. Thus, the strategy of flying along the coast at low altitude (< 500 m) is favoured when the wind blows from the east before departure. The strategy of flying southeast to reach Sardinia or Tunisia is favoured by strong winds before departure. Finally, a drop in temperature 24 hours before departure favours long flights of around 20 hours, directly over the sea.

Small terrestrial birds tracked with geolocators

Of the 315 devices deployed on 19 different species of small migratory birds, 66 GLS devices from 17 species were recovered. Among all the flights and trajectories analysed, we were able to identify 28 flights corresponding to sea crossings of the Mediterranean Sea, but only in 8 of these species. This distribution suggests that some species are potentially more inclined than others to migrate over the sea. This is the case, for example, with the northern wheatear (3 individuals that crossed the sea out of 3 GLS recovered) or the tawny pipit (4 individuals that crossed the sea out of 5 GLS recovered) or the yellow wagtail (four individuals crossed the sea out of five GLS recovered).

With regard to flight altitude, it was observed that ten of the 28 crossings (36%) took place at a median altitude of less than 500 metres above sea level. More specifically, northern wheatears flew at an average altitude of 112 ± 137 m (n = 5 flights), while tawny pipits flew at an average altitude of 572 ± 455 m (n = 8 flights). These altitudes are particularly low compared to those generally observed in small migratory birds when flying over land or other types of ecological barriers such as deserts.

In addition, a clear trend towards lower altitudes during the day was observed in individuals that continued flying beyond nightfall. Birds that travelled the first part of their migratory flight at night at a certain altitude then descended to lower altitudes, closer to sea level, to complete their migration.

Despite the limited number of samples, these results are unique in that they offer one of the first detailed insights into sea crossings by small migratory birds. The fact that a significant proportion of long flights across the Mediterranean take place at altitudes of less than 500 metres places these birds at the height of the blades of the wind turbines. This risk is particularly concerning in spring, when birds are heading north. If the crossing cannot be completed in a single night, individuals would find themselves at very low altitude during the day, prolonging their flight at the height of the blades.

Conclusion

New data was obtained as part of the MIGRALION telemetry batch. A wide range of bird OF DIFFERENT sizes were tagged, from 12g common redstarts to flamingos weighing over 4kg, in order to gain knowledge about the crossing of the Mediterranean Sea by as representative a sample as possible of migratory and seabirds. The data obtained was analysed in greater depth in Lot 6, supplemented by additional telemetry data sets from other species and incorporating data sets from observations during sea campaigns (Lot 4) and coastal radars (Lot 5).

Although the dataset covering 40 species remains modest compared to an estimated 300 species of migratory birds in the region, a number of species had never been tagged before and new information was obtained on their passage at sea. Examples include the collared pratincole, the squacco heron, the dotterel and the yellow wagtail.

In the context of increasing human activity at sea, particularly floating wind farms, it would be appropriate to increase the number of species tagged in order to be more representative of the migratory bird guild, especially the small birds that are underrepresented. Our results show that both large and small migratory birds frequently fly within the reach of the blades of planned wind farms. Spatial data on the flight height of large birds, whether migratory or seabirds, suggest a risk of probable direct (collision) or indirect (avoidance) interactions with projects currently under development. Spatialised data on the flight height of birds weighing less than 75g is crucial for identifying areas of interaction between these small birds and future offshore wind farms.

It would be particularly interesting to repeat capture and telemetry tracking campaigns on the same species once the first wind farm has been established, in order to understand whether the birds change their behaviour in response to these new elements in the landscape. Bird migration is a dynamic phenomenon and species can quickly change their behaviour in light of new obstacles, changes in the availability of stopover sites, or changes in environmental variables, potentially invalidating in the future some of the conclusions stated here.

The prospects for this work could consist to take into account the cumulative effects of wind farms (GT ECUME) on migratory bird populations by aiming, on the one hand, to quantify the mortality rate caused by these new obstacles and, on the other hand, to study the demographic consequences for populations as addressed by the BIRD RISK, BIRDMOVE and BIRD DYNAMIC studies for seabirds.

Table des matières

Contexte et objectifs du programme MIGRALION **4**

Objectifs de ce rapport **7**

Résumé étendu – Lot 3 « Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins » **9**

Extended abstract – WP3 "Telemetry tracking of terrestrial migratory birds and seabirds" **14**

Table des matières **17**

Table des Figures **18**

Table des Tableaux **20**

Lot 3 : Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins **21**

3.1 Objectifs du lot 22

3.1.1 Consortium du lot 3 22

3.1.2 Objectifs généraux du lot 3 22

3.2 Méthodologies et protocoles 22

3.2.1 Espèces visées et techniques de capture 22

3.2.2 Technologies employées 25

3.2.3 Plan d'échantillonnage 27

3.2.4 Méthodes de traitements et d'analyse des données 30

3.3 Résultats et discussions 38

3.3.1 Description des campagnes d'acquisition des données 38

3.3.2 Résultats Oiseaux marins 40

3.3.3 Résultats Oiseaux terrestres (GPS) 50

3.3.4 Résultats Oiseaux terrestres (GLS) 65

3.4 Bilan du lot 3 et perspectives 72

3.5 Références bibliographiques 74

3.6 Remerciements du lot 3 78

Valorisation des résultats du lot 3 ..... **80**

Remerciements généraux **83**

Annexes **84**

Annexe 1 : Modélisation des hauteurs de vol des oiseaux marins 84

Annexe 2 : Fiches de synthèse de la migration au-dessus du golfe du Lion pour chaque espèce terrestre suivie par balise GPS 85

Annexe 3 : Fiches de synthèse de la migration pour les 19 espèces terrestres suivies par balise GLS 122

Annexe 4 : Rapport de Léo Denoual 141

Table des Figures

Figure 1 : illustration des geofences utilisées pour augmenter l'acquisition de positions GPS lors de la traversée de la Méditerranée. A : carte des 20 géofences prédéfinies (10 en rouge et 10 en vert, la programmation étant la même dans chaque zone). Notez qu'il a fallu organiser les geofences pour qu'elles ne chevauchent aucune terre ou île. B : détail des positions obtenues lors d'une traversée du golfe du Lion par un ibis falcinelle entre la Camargue et le Delta de l'Ebre. C : détail du début de la traversée : les positions étaient enregistrées avec un intervalle de 10 minutes hors des géofences, puis avec un intervalle de 3 minutes dans la geofence. D : détail de la programmation en burst (séquence de 15 positions enregistrées à 1 seconde d'intervalle) 26

Figure 2 : Répartition des sites de captures d'oiseaux. Les triangles verts représentent les sites de captures et les secteurs orange les communes 30

Figure 3 : Représentation des Zones de développement éolien (ZDE) dans l'emprise du golfe du Lion, différenciant la bande côtière 0-15 km et la zone pélagique (au-delà de 60 km). 31

Figure 4 : Schéma synthétique du processus d'analyse des données collectées par les balises GPS des oiseaux marins. Les numéros font référence aux 5 étapes d'analyse détaillées dans le texte. 32

Figure 5 : exemple de fiche espèce pour la spatule blanche Platalea leucorodia 35

Figure 6 : Stratégies de vol migratoire au-dessus du golfe du Lion 36

Figure 7 : Catégories d'altitudes choisies pour une éolienne prévue d'environ 300 m de haut, hauteur représentative pour les éoliennes des futurs parcs commerciaux 36

Figure 8 : Schéma synthétique du processus d'analyse des données GLS pour les petits oiseaux terrestres. Les données GLS (lumière, pression et activité) ont été utilisées, dans un premier temps, pour déterminer la position des oiseaux au cours de leur cycle migratoire, puis dans un second temps, pour étudier leurs comportements de vol lors des traversées marines (notamment grâce à la pression et l'activité). 38

Figure 9 : Distribution d'utilisation (UD) (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek à l'échelle du bassin occidental méditerranéen 41

Figure 10 : Distribution d'utilisation (UD) (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek dans le golfe du Lion. 42

Figure 11 : Répartition spatiale des 31 puffins yelkouans suivis en 2022 et 2023, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, (B) de vol de transit , ou (C) de repos, dans le golfe du Lion. 43

Figure 12 : Répartition spatiale des 40 puffins de Scopoli suivis en 2021 et 2022, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, (B) de vol de transit, ou (C) de repos, dans le golfe du Lion. 44

Figure 13 : Répartition spatiale des 26 sternes caugek suivis entre 2021 et 2023, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, ou (B) de vol de transit dans le golfe du Lion. Les phases de repos étant quasiment exclusivement sur terre à la côte, elles ne sont pas représentées ici. 45

Figure 14 : Probabilité d'être au repos (jaune), en recherche alimentaire (bleu) ou en vol de transit (vert) pour (A,D) les puffins yelkouan, (B,E) les puffins de Scopoli et (C,F) les sternes caugek lorqu'ils sont en mer, en fonction de l'heure de la journée (A,B,C) et la vitesse du vent (D,E,F). La moyenne populationnelle (ligne continue) et son intervalle de confiance à 95% (ligne pointillée), ainsi que la distribution à 95% des prédictions individuelles (zone en transparence) sont indiquées. 46

Figure 15 : Distribution modélisée des hauteurs de vol (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek. La moyenne (ligne continue) et son intervalle de crédibilité à 95% (ligne pointillée) sont représentés. 47

Figure 16 : Distribution modélisée des hauteurs de vol (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek en fonction de la vitesse du vent et de la direction relative du vent. La zone grisée représente la tranche d'altitude des pâles des futures éoliennes où le risque de collision est possible. 48

Figure 17 : Proportion moyenne du temps passé à voler à hauteur de risque de collision (> 22 m) durant la journée (jaune), et la nuit (bleu), avec son intervalle de confiance à 95%, pour des conditions marines moyennes (médiane de la distribution des vitesses de vents et hauteur de vagues, point) et pour des conditions de forts

vents et de mer houleuses (95ème percentile, triangle) pour chaque espèce, ajustée pour les proportions de direction relative de vent par espèce. 49

Figure 18 : Proportion d'individus ayant fourni des données de migration exploitables, pour chaque espèce. La taille d'échantillon est donnée en bandeau au-dessus..... 51

Figure 19 : Proportion d'individus ayant traversé le golfe du Lion, pour chaque espèce. Le code couleur indique la direction de traversée (Nord-Sud en bleu foncé, Sud-Nord en bleu clair). La taille d'échantillon est donnée en bandeau au-dessus. 52

Figure 20 : Carte globale de l'ensemble des 406 trajets migratoires des 19 espèces d'oiseaux "terrestres" suivis par balise GPS entre 2021 et 2025. 53

Figure 21 : Trajectoires de migration dans le golfe du Lion pour 5 groupes d'espèces: A. Hérons (héron pourpré, crabier chevelu, blongios nain), B. Grands échassiers (flamant rose, spatule blanche, ibis falcinelle), C. Limicoles (pluvier guignard, glaréole à collier, échasse blanche, avocette élégante), D. Laridae (goéland railleur, mouette rieuse, mouette mélanocéphale, sterne hansel), E: Oiseaux terrestres (coucou-geai, faucon crécerellette, rollier d'Europe, tourterelle des bois). Les directions de vol Nord-sud et Sud-Nord ne sont pas distinguées. 55

Figure 22 : Stratégies de traversée du golfe du Lion pour chaque espèce, dans la direction Nord-Sud (en haut) et dans la direction Sud-Nord (en bas). Les types de stratégies de migration font référence à la Figure 6 : Stratégies de vol migratoire au-dessus du golfe du Lion. La taille d'échantillon (nombre de vols total) est indiquée en bandeau au-dessus de chaque graphe..... 57

Figure 23 : Proportion de distance parcourue (en km) pour chaque espèce par zone du golfe du Lion (Zone côtière de 0 à 15 km, Zone intermédiaire de 15 à 60 km, Zone pélagique au-delà de 60 km). Les zones de développement éolien (ZDE) se situent dans la Zone intermédiaire. A droite de la ligne en pointillé rouge est indiquée la proportion de surface que chaque zone occupe dans le golfe du Lion. Les graphes du haut et du bas représentent respectivement les migrations Nord-Sud et Sud-Nord (Il manque de données pour 4 espèces pour la migration Sud-Nord). 58

Figure 24: Proportion de distance parcourue (en km) pour chaque espèce dans la zone intermédiaire (de 15 à 60 km) du golfe du Lion, détaillant les 8 zones de développement éolien (ZDE) et la zone hors ZDE. A droite de la ligne en pointillé rouge est indiquée la proportion de surface que chaque zone occupe dans la zone intermédiaire du golfe du Lion. Les graphes du haut et du bas représentent respectivement les migrations Nord-Sud et Sud-Nord (Il manque de données pour 4 espèces pour la migration Sud-Nord). 59

Figure 25 : Hauteur de vol pour chaque espèce, dans la zone intermédiaire (15-60 km de la côte) pour les directions de migration Nord-Sud (en haut) et Sud-Nord (en bas). Les moyennes et écart-types sont comparés à l'intérieur des ZDE (en rouge) et en dehors (en noir). Les lignes horizontales colorées donnent les repères des classes d'altitude (20 m en rouge, 300 m en orange, 500 m en jaune, 1000m en vert). 61

Figure 26 : Description des données utilisées dans la présente étude. A. Répartition entre espèces (n = 15) des vols migratoires partant de la partie terrestre du golfe du Lion et traversant la Méditerranée (n = 121). B. Phénologie de la migration post-nuptiale pour tous les individus inclus dans l'étude. La date de départ est donnée en date calendaire, à partir du premier jour de janvier. C. Exemples de trajectoires de vol d'oiseaux de différentes espèces lors de la traversée de la Méditerranée, et profils d'altitude associés. Les profils d'altitude représentent la variation de l'altitude de vol (en mètres au-dessus du niveau de la mer) pendant toute la durée de la traversée. Silhouettes reproduites à partir de PhyloPic (http://phylopic.org/) sous une licence Creative Commons. 62

*Figure 27 **:** Caractérisation des stratégies de vol pour traverser la Méditerranée à partir de 121 vols migratoires postnuptiaux. Le panneau de gauche présente les trajectoires des vols appartenant à chaque stratégie. Le panneau de droite contient des diagrammes en boîte des valeurs des 8 variables descriptives pour chaque stratégie. A. Stratégie 1 (n = 45 vols) ; B. Stratégie 2 (n = 19) ; C. Stratégie 3 (n = 8) ; D. Stratégie 4 (n = 23) et E. Stratégie 5 (n = 26)...... 64*

*Figure 28 **:** Localisations et variations de la durée et de l'altitude des vols chez de petites espèces migratrices lors de la traversée d'une barrière marine (ici différentes parties de la mer Méditerranée). En A, chaque vol est représenté par une ligne grise, avec un point coloré indiquant la zone stationnaire précédente ; les couleurs correspondent aux espèces (voir code couleur en B). Nous avons pris en compte à la fois les vols directs depuis le sud de la France ou le nord de la péninsule Ibérique vers le continent africain, ainsi que ceux comprenant une*

escale dans les îles Baléares. En B, les valeurs moyennes par espèce des altitudes médianes et des durées de vol sont présentées. En C, les durées de vol (en heures) sont représentées en fonction des altitudes médianes (en mètres au-dessus du niveau de la mer). Chaque point correspond à un vol, coloré selon l'espèce. Les barres jaunes et grises indiquent respectivement les périodes diurnes (8h00–16h00 UTC) et nocturnes (20h00–4h00 UTC). Sur les deux profils d'altitude, les lignes épaissies indiquent la partie du vol effectuée au-dessus de la mer. 68

Figure 29 : Différences d'altitude de vol entre le jour et la nuit chez de petites espèces migratrices lors de la traversée de barrières marines. Cette figure concerne uniquement les vols qui durent plus d'une nuit. L'axe des abscisses indique la différence d'altitude (jour moins nuit), les valeurs positives représentant des altitudes de vol plus élevées pendant la journée, et les valeurs négatives des altitudes plus élevées la nuit. Les points les plus gros représentent les valeurs moyennes. 69

Figure 30 : Profil d'altitude des 28 vols de traversées marines identifiés chez les petits oiseaux migrateurs équipés de GLS. Les barres jaunes et grises indiquent respectivement les périodes diurnes (8h00–16h00 UTC) et nocturnes (20h00–4h00 UTC)..... 71

Table des Tableaux

Tableau 1 : *Synthèse des 40 espèces capturées dans le cadre du lot 3. La catégorie de télémétrie indique le type de matériel de suivi télémétrique déployé (balise GPS ou GLS) et le mode d'approche d'analyse qui sera réalisé (distinguant les analyses d'utilisation du golfe du Lion pour les oiseaux marins, des analyses de trajet migratoire pour les oiseaux terrestres). Les méthodes de capture et les lieux principaux de capture (avec le département entre parenthèses) sont également indiqués. 23*

Tableau 2 : *Liste des 41 espèces équipées de GPS exploitées dans le cadre de cette étude, distinguant les 3 catégories d'espèces (oiseaux marins suivis par GPS, oiseaux terrestres suivis par GPS et oiseaux terrestres suivis par GLS). La dernière colonne indique le nombre d'individus dont les données sont exploitables (GPS : individus ayant survécu ou conservé leur balise assez longtemps pour être utilisé pour étudier le survol ou la fréquentation du golfe du Lion; GLS: individus recapturés et où les données de migration étaient exploitables). 28*

Tableau 3: *Détail par espèce des nombres de traversées marines disponibles..... 66*

MIGRALION

Lot 3 : Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins

Livrable L19 : rapport final d'analyse des données



Crédit photo : Olivier Duriez

Auteurs

CHAMPAGNON Jocelyn[1], COURBIN Nicolas[2], DUFOUR Paul[1,2], TILLO Stéphan[1], DENOUAL Léo[1, 2], GREMILLET David[2], JIGUET Frédéric[3], DURIEZ Olivier[2]

[1] Tour du Valat, Institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes, Arles, France
[2] CEFE, University of Montpellier, CNRS, EPHE, IRD , Montpellier, France
[3] UMR7204 Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation MNHN-CNRS-Sorbonne Université, Paris, France

Partenaires scientifiques et techniques du lot 3

1. Objectifs du lot

1.1 Consortium du lot 3

Dans le cadre du programme MIGRALION, le volet Télémétrie est porté par la Tour du Valat, le Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO, UMR7204, MNHN), et le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE, UMR5175).

1.2 Objectifs généraux du lot 3

Parmi les moyens déployés pour répondre aux enjeux du programme MIGRALION, la télémétrie, objet du lot 3, consiste à équiper des oiseaux de balises de géolocalisation miniaturisées. Ces instruments permettent d'obtenir des données de déplacements individuels des oiseaux marins et terrestres, durant leur reproduction en France et/ou durant leur migration, en particulier à travers le golfe du Lion. Pour les espèces marines, les objectifs généraux sont de connaître les zones utilisées en mer (alimentation, repos), aussi bien en période de reproduction qu'en dispersion hivernale, et leurs altitudes de vol. Pour les espèces terrestres, il s'agit de pouvoir déterminer les voies et périodes de passage et les altitudes de vol lors des trajets migratoires, à l'arrivée ou au départ des côtes du golfe du Lion.

Toutes les espèces d'oiseaux n'utilisent pas le golfe du Lion de la même façon, aussi l'objectif initial était d'équiper 33 espèces différentes représentant un panel significatif des oiseaux susceptibles d'utiliser ou de survoler le golfe du Lion avec un nombre d'individus minimum de 20 individus par espèces afin de considérer les variations individuelles sur plusieurs années au sein d'une espèce. Au final, plus de 1000 individus issus de 40 espèces d'oiseaux ont été équipés d'appareils de géolocalisation embarquée entre 2021 et 2024 (GPS et GLS).

Les données collectées servent à alimenter les modèles développés dans le **lot 6** (voir le rapport final de ce lot ; Canonne et al. 2025).

2. Méthodologies et protocoles

2.1 Espèces visées et techniques de capture

A la soumission du projet, il était prévu le suivi télémétrique de 33 espèces : 3 espèces de rapaces, 7 espèces marines, 9 échassiers migrateurs de zones humides, 14 migrateurs terrestres dont 7 passereaux. Ce choix s'est fait sur des critères d'enjeux de conservation, de la représentativité des espèces migratrices abondantes, ainsi que de la faisabilité technique. Au cours de la première année initiée à l'été 2021, des réajustements ont été opérés, en particulier grâce aux améliorations technologiques constantes qui permettent d'équiper des espèces de plus petites tailles de GLS (par exemple le rougequeue à front blanc ou le gobemouche gris) mais aussi pour éviter le dérangement sur des espèces trop sensibles (océanite tempête) ou difficiles d'accès administrativement tel que le puffin des Baléares qui a été abandonné. L'expérience acquise lors de la saison 2022 a permis d'autres ajustements sur les espèces étudiées. Ainsi, à la fin du projet, 40 espèces ont été équipées : 3 espèces marines, 12 espèces de zones humides, 25 migrateurs terrestres dont 3 espèces de rapaces et 17

passereaux. Plusieurs techniques de capture ont été mises en place et adaptées à chaque espèce. Le matériel déployé est également détaillé ci-dessous (c.f. section **2.2**). Technologies employées).

Tous les oiseaux équipés ont été équipés dans le cadre du Programme Personnel (PP) 1190 validé par des experts nationaux et par le Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (CRBPO), l'organisme public français de gestion du baguage et marquage des oiseaux. En plus des balises, tous les oiseaux ont été marqués avec des bagues métal fournies par le CRBPO (MNHN Paris), à l'exception du faucon d'Éléonore, marqué en Espagne avec des bagues espagnoles. Certaines espèces ont été aussi marquées de bagues colorées et/ou gravées permettant leur suivi visuel à distance. Durant le temps du programme, de nombreuses démarches administratives ont été réalisées afin d'obtenir les autorisations de capture auprès des propriétaires et/ou des gestionnaires de sites, en particulier les terrains du Conservatoire du Littoral, dans les espaces protégés tels que la réserve du Scamandre, les réserves nationales de Crau et des Marais du Vigueirat, la réserve régionale de la Tour du Valat, le Parc National de Port-Cros et le Parc National des Calanques.

Le déploiement sur le terrain (capture et poses d'équipements embarqués) a été rendu possible par les embauches d'un technicien de recherche, bagueur généraliste confirmé pour l'ensemble du projet MIGRALION (2021-2024), assisté par sept différents bagueur.se.s ou assistants bagueur.se.s sous contrat lors des campagnes de terrain (printemps 2021, 2022, 2023 et 2024), et de nombreu.ses.x bénévoles (voir les remerciements, section 6). L'expérience du bagueur principal lui a permis d'être directement opérationnel sur le terrain pour capturer les effectifs attendus et les espèces visées. Il a été largement secondé par de nombreux naturalistes et bagueur.se.s ou assistants bagueur.se.s des structures partenaires qui sont présentées dans les remerciements.

Tableau 1 : *Synthèse des 40 espèces capturées dans le cadre du lot 3. La catégorie de télémétrie indique le type de matériel de suivi télémétrique déployé (balise GPS ou GLS) et le mode d'approche d'analyse qui sera réalisé (distinguant les analyses d'utilisation du golfe du Lion pour les oiseaux marins, des analyses de trajet migratoire pour les oiseaux terrestres). Les méthodes de capture et les lieux principaux de capture (avec le département entre parenthèses) sont également indiqués.*

Catégorie de télémétrie	Famille	Espèce nom vernaculaire	Espèce nom scientifique	Lieu de capture
Marin / GPS	Procellariidae	Puffin yelkouan	*Puffinus yelkouan*	Ile de Port-Cros (83) / PN Port Cros
Marin / GPS	Procellariidae	Puffin de Scopoli	*Calonectris diomedea*	Ile de Riou (13) / PN Calanques
Marin / GPS	Laridae	Sterne caugek	*Thalasseus sandvicensis*	Lido de Thau (34)
Terrestre / GPS	Ardeidae	Héron pourpré	*Ardea purpurea*	RNN du Marais du Vigueirat (13)/ RNR du Scamandre (30)
	Ardeidae	Crabier chevelu	*Ardeola ralloides*	RNN du Marais du Vigueirat (13)/ RNR du Scamandre (30)/ ENS Marais de Coute (30)
	Ardeidae	Blongios nain	*Botaurus minutus*	RNR du Scamandre (30)/ ENS Marais de Coute (30)/ Lac du Salagou (34)/Marais du Boulas (34)
	Phoenicopteridae	Flamant rose	*Phoenicopterus roseus*	Salins d'Aigues-Mortes (30)
	Threskiornithidae	Spatule blanche	*Platalea leucorodia*	Camargue (13)

	Threskiornithidae	Ibis falcinelle	*Plegadis falcinellus*	RNR du Scamandre (30)/ ENS Marais de Gargatte(30)/L es Saintes-Maries-de-la-Mer(13)
	Falconidae	Faucon d'Eléonore	*Falco eleonorae*	RN Islas Columbretes (Espagne)
	Falconidae	Faucon crecerellette	*Falco naumanni*	RNN des Coussouls de Crau (13)
	Glareolidae	Glaréole à collier	*Glareola pratincola*	Saint-Laurent-d'Aigouze (30)/ Arles (13)
	Recurvirostridae	Echasse blanche	*Himantopus himantopus*	Canaverier (30)/ Marais de Beauchamp (13)/ RNR du Scamandre (30)/ RNR de Mahistre et Musette (30)/ Salins d'Aigues-Mortes (30)/ Salins d'Hyères (13)
	Recurvirostridae	Avocette élégante	*Recurvirostra avosetta*	RNR de Mahistre et Musette (30)/Salins d'Aigues-Mortes (30)/ Salins de Giraud (13)/ Salins d'Hyères(83)
	Charadriidae	Pluvier guignard	*Charadrius morinellus*	RNN des Coussouls de Crau (13)/Montagne Sainte-Baume (83)
	Laridae	Mouette mélanocéphale	*Ichthyaetus melanocephalus*	Gard (30)
	Laridae	Goéland railleur	*Chroicocephalus genei*	Salins de Giraud (13)/ Salins d'Hyères (83)
	Laridae	Sterne Hansel	*Gelochelidon nilotica*	RNR du Scamandre (30)
	Columbidae	Tourterelle des bois	*Streptopelia turtur*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)/ Ferme du Grand Laval (26)
	Coraciidae	Rollier d'Europe	*Coracias garrulus*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)
	Cuculidae	Coucou geai	*Clamator glandarius*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)
Terrestre / GLS	Caprimulgidae	Engoulevent d'Europe	*Caprimulgus europaeus*	Rouet (34)
	Strigidae	Petit-duc Scops	*Otus scops*	Hérault (34)/ Gard (30)
	Meropidae	Guêpier d'Europe	*Merops apiaster*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)
	Upupidae	Huppe fasciée	*Upupa epops*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)/ Aude (11)
	Laniidae	Pie-grièche à tête rousse	*Lanius senator*	Hérault (34)
	Hirundinidae	Hirondelle rustique	*Hirundo rustica*	Hérault (34)/ Bouches-du-Rhône (13)
	Hirundinidae	Hirondelle rousseline	*Cecropis daurica*	Hérault (34)/ Gard (30)
	Hirundinidae	Hirondelle de fenêtre	*Delichon urbicum*	Le Sambuc (13)
	Sylvidae	Rousserolle turdoïde	*Acrocephalus arundinaceus*	Lac du Salagou (34)/ Arles (13)

Sylvidae	Fauvette orphée	*Curruca hortensis*	Rouet (34)
Muscicapidae	Gobemouche gris	*Muscicapa striata*	Rouet (34)
Muscicapidae	Rougequeue à front blanc	*Phoenicurus phoenicurus*	Rouet (34)/ Les Baux-de-Provence (13)
Muscicapidae	Monticole de roche	*Monticola saxatilis*	Montpeyroux (34)
Muscicapidae	Tarier des prés	*Saxicola rubetra*	Savoie (73)/Haute-Savoie (74)
Muscicapidae	Traquet motteux	*Oenanthe oenanthe*	Bouvante (26)
Muscicapidae	Rossignol philomèle	*Luscinia megarhynchos*	Rouet (34)/ Domaine de la Tour du Valat (13)
Motacillidae	Bergeronnette printanière	*Motacilla flava*	RNR de Mahistre et Musette (30)/Domaine de la Tour du Valat (13)
Motacillidae	Pipit rousseline	*Anthus campestris*	Hérault (34)/ Gard (30)/ Bouches-du-Rhône (13)
Motacillidae	Pipit des arbres	*Anthus trivialis*	PNR du Vercors (26 et 38)

2.2 Technologies employées

2.2.1 Télémétrie GPS

Les trois espèces d'oiseaux marins et les 19 espèces d'oiseaux terrestres de plus de 75 g ont été équipées avec des balises GPS-GSM permettant une fréquence d'acquisition élevée de positions GPS et un transfert des données via le réseau téléphonique sans avoir besoin de recapturer les individus. Le poids des balises dépendait de l'espèce et il était compris entre 3g et 25g pour ne pas dépasser le seuil critique de 5% du poids de l'oiseau (harnais et balises compris). Deux marques ont été utilisées : *Interrex* et *Ornitela*. La seule exception concernait un lot de 7 glaréoles à collier équipées en 2023, avec des balises GPS de marque *Pathtrack* qui ne transmettent pas de données via le réseau GSM mais par transmission à l'aide d'une antenne UHF dans un rayon de 300 mètres environ.

Ces balises étaient équipées de batteries alimentées par l'énergie solaire grâce à des panneaux, et collectaient des positions à des intervalles pouvant varier entre 5 minutes et 1 heure selon le niveau de charge de la batterie. Pour les balises de marque Ornitela, des *geofences* ont été définies au-dessus du golfe du Lion permettant de programmer une acquisition de données avec une fréquence accrue lorsque l'individu les survole, appelée *burst* (**Figure 1**). Bien que ce mode de fonctionnement générait une forte variabilité d'intervalle entre les positions recueillies, au sein d'un même trajet ou entre les individus, il a permis néanmoins d'obtenir une estimation plus précise de l'altitude de vol de l'oiseau lors des traversées marines.

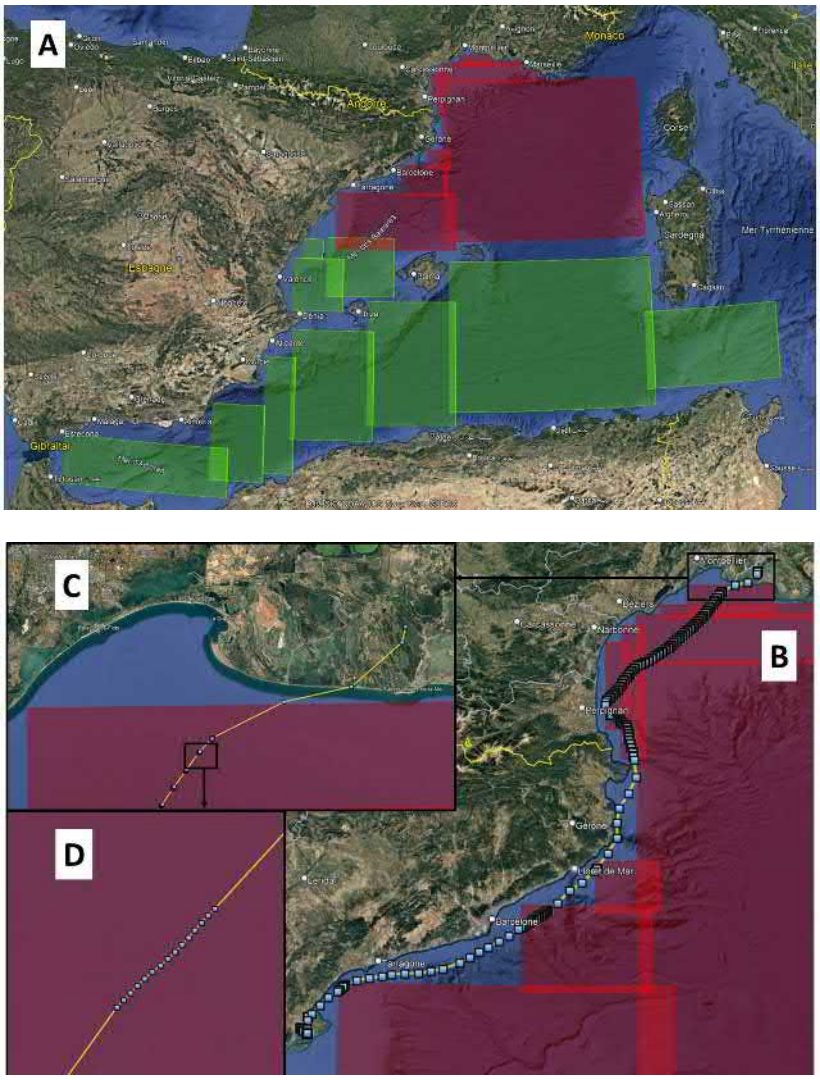


Figure 1 : illustration des geofences utilisées pour augmenter l'acquisition de positions GPS lors de la traversée de la Méditerranée. A : carte des 20 géofences prédéfinies (10 en rouge et 10 en vert, la programmation étant la même dans chaque zone). Notez qu'il a fallu organiser les geofences pour qu'elles ne chevauchent aucune terre ou île. B : détail des positions obtenues lors d'une traversée du golfe du Lion par un ibis falcinelle entre la Camargue et le Delta de l'Ebre. C : détail du début de la traversée : les positions étaient enregistrées avec un intervalle de 10 minutes hors des géofences, puis avec un intervalle de 3 minutes dans la geofence. D : détail de la programmation en burst (séquence de 15 positions enregistrées à 1 seconde d'intervalle)

Toutes les données télémétriques étaient automatiquement téléversées sur la plateforme de gestion de données de télémétrie Movebank et permettent un archivage sécurisé, ainsi qu'un suivi en temps réel des déplacements des individus équipés via une carte interactive. A partir de cette plateforme, les données ont été exportées pour l'analyse sur des logiciels tels que Google Earth, R (version 4.4.1) et QGIS (version 3.34.0).

2.2.2 Géolocalisateurs (GLS)

Pour les petits oiseaux migrateurs (<75g), il n'existe pour le moment aucune technique permettant de suivre en direct un individu. Le suivi de ces petites espèces repose donc sur l'utilisation d'appareils qui

stockent différentes informations, nécessitant la recapture du même individu après sa migration pour pouvoir accéder aux données et estimer son trajet.

Ce suivi a longtemps reposé sur l'utilisation de photomètres géolocalisateurs (en anglais *light-level geolocators,* appelé *GLS* dans la suite du document). Ces GLS enregistrent la lumière ambiante pour estimer les heures de lever et de coucher du soleil, permettant ainsi de déduire approximativement la position géographique de l'oiseau, notamment la latitude (via la durée du jour) et la longitude (via les heures de lever, de coucher du soleil, du zénith). Toutefois, cette méthode de positionnement reste imprécise (de l'ordre de quelques dizaines à centaines de kilomètres), surtout si l'oiseau occupe des habitats avec peu de lumière (forêts, cavités...) ou même lors des équinoxes ou des périodes nuageuses.

Aujourd'hui, les GLS modernes intègrent plusieurs capteurs, notamment un accéléromètre pour mesurer l'activité de l'oiseau et identifier les phases de vol actif de migration, et un capteur de pression atmosphérique (Rhyme et al. 2024, Rime et al. 2023). Ces données enregistrées toutes les 5 à 20 minutes peuvent être croisées et permettre de mieux comprendre les comportements migratoires, les périodes de repos, les altitudes de vol ou encore les environnements traversés. Par exemple, lorsqu'un oiseau part en migration, il démarre son vol et monte en altitude, il est alors facile de détecter cet événement dans les données par une baisse de pression et une augmentation simultanée de l'activité pendant la durée exacte du vol. Les données du baromètre sont aussi utilisées pour déterminer de manière plus précise la localisation des sites de halte migratoire, en croisant les données de pression au sol (connues par la balise et des stations météorologiques) et de luminosité. Ces nouveaux dispositifs offrent une richesse de données permettant une analyse inédite des vols migratoires pour les petites espèces d'oiseaux.

Nous avons déployé deux types de GLS: des GDL3-PAM fabriqués par la station ornithologique suisse de Sempach (1,2 g avec harnais) et des CARP30Z11-7-DIP fabriqués par la société anglaise *Migrate Technology* (0,6 g avec harnais). Les GLS GDL3-PAM enregistrent les données de pression toutes les 5 minutes et les données d'activité toutes les 30 minutes. Les GLS CARP30Z11-7-DIP enregistrent à la fois les données de pression et d'activité toutes les 20 minutes. Les données de lumières sont collectées pour les deux types de GLS toutes les 5 minutes.

Afin de tester si la technologie embarquée n'impliquait pas d'effet sur le taux de retour des oiseaux migrateurs, des individus témoins ont été équipés d'une bague métal MNHN à la patte ou de bagues visible à distance chaque fois que cela était possible. Les caractéristiques des oiseaux témoin sont similaires en âge et en masse aux oiseaux équipés. Les taux de retour ont été comparés pour les petits oiseaux entre ceux équipés initialement d'un GLS et ceux revus ou recapturés.

2.3 Plan d'échantillonnage

Entre 2021 et 2024, la collecte de données dans le cadre du lot 3 a nécessité d'équiper 824 individus de 40 espèces d'oiseaux différentes. Le Tableau 2 dresse le bilan du nombre d'individus capturés et équipés dans le cadre de MIGRALION. Des données complémentaires issues d'autres programmes télémétriques ont été incluses, à savoir:

- 174 puffins de Scopoli, données acquises depuis 2011 dans le cadre des programmes PACOMM, INDEXPUF et ORNIT-EOF,

- 20 puffins yelkouan et 24 sternes caugek, données acquises dans le cadre des mesures de suivi et d'accompagnement des fermes pilotes EFGL et EOLMED.
- 42 mouettes rieuses, données acquises depuis 2017 par le baguage dans le Forez (Loire) dans le cadre d'un programme du CEFE porté par Aurélien Besnard (PP 382)
- 89 faucons crécerellettes, données acquises depuis 2016 dans le cadre du Plan National d'Action pour le Faucon crécerellette et du suivi du parc éolien d'Aumelas (EDF) porté par Philippe Pilard.

Au total, les données de 673 individus de 39 espèces sont exploitables (c'est-à-dire avec au moins un vol migratoire enregistré, ou bien, pour les migrateurs partiels, la survie de l'individu jusqu'à la période migratoire même s'il n'est pas parti), et ont été retenues pour les analyses. La différence avec le nombre d'oiseaux équipés correspond aux petits oiseaux équipés de géolocalisateurs qui n'ont pas été recapturés.

Tableau 2 : *Liste des 41 espèces équipées de GPS exploitées dans le cadre de cette étude, distinguant les 3 catégories d'espèces (oiseaux marins suivis par GPS, oiseaux terrestres suivis par GPS et oiseaux terrestres suivis par GLS). La dernière colonne indique le nombre d'individus dont les données sont exploitables (GPS : individus ayant survécu ou conservé leur balise assez longtemps pour être utilisé pour étudier le survol ou la fréquentation du golfe du Lion; GLS: individus recapturés et où les données de migration étaient exploitables).*

Catégorie	Espèce nom scientifique	N individus équipés MIGRALION	N individus équipés autre programme	N individus exploitables
Marin / GPS	*Puffinus yelkouan*	18	20	38
	Calonectris diomedea	31	174	205
	Thalasseus sandvicensis	2	24	26
Marin / GPS	**Sous-total**	**51**	**218**	**269**
Terrestre / GPS	*Ardea purpurea*	15		12
	Ardeola ralloides	27		18
	Charadrius morinellus	20		13
	Chroicocephalus genei	41		19
	Chroicocephalus ridibundus		42	23
	Clamator glandarius	24		16
	Coracias garrulus	32		11
	Falco eleonorae	15		11
	Falco naumanni	29	89	50
	Gelochelidon nilotica	10		8
	Glareola pratincola	20		4
	Himantopus himantopus	17		7
	Ichthyaetus melanocephalus	20		19

	Botaurus minutus	22		4
	Phoenicopterus roseus	50		37
	Platalea leucorodia	36		36
	Plegadis falcinellus	25		22
	Recurvirostra avosetta	29		13
	Streptopelia turtur	26		15
Terrestre / GPS	**Sous-total**	**458**	**131**	**338**
Terrestre / GLS	*Caprimulgus europaeus*	11		2
	Otus scops	7		4
	Merops apiaster	27		4
	Upupa epops	21		4
	Lanius senator	21		3
	Hirundo rustica	16		4
	Cecropis daurica	12		0
	Delichon urbicum	10		2
	Acrocephalus arundinaceus	25		2
	Curruca hortensis	25		6
	Muscicapa striata	10		5
	Phoenicurus phoenicurus	20		4
	Monticola saxatilis	3		1
	Saxicola rubetra	23		7
	Oenanthe oenanthe	15		3
	Luscinia megarhynchos	21		3
	Motacilla flava	20		6
	Anthus campestris	21		5
	Anthus trivialis	7		0
Terrestre / GLS	**Sous-total**	**315**	**0**	**66**
Total général		**824**	**349**	**673**

Afin de limiter un biais spatial des collectes de données, le plan d'échantillonnage a été discuté avec les experts du **lot 2** (coordination scientifique) et du **lot 6** (analyses combinées). Il couvre toute la côte du golfe du Lion afin d'éviter, en particulier, de concentrer l'ensemble des équipements sur la Camargue même si cet espace concentre de nombreuses espèces et des abondances fortes d'oiseaux. L'objectif, lorsque cela était possible, était de réaliser les 2/3 des captures sur la partie Est (Camargue jusqu'aux Salins d'Hyères) où les oiseaux seraient les plus susceptibles de traverser en mer selon un axe Nord-Sud et un tiers sur la partie Ouest (**Figure 2**).

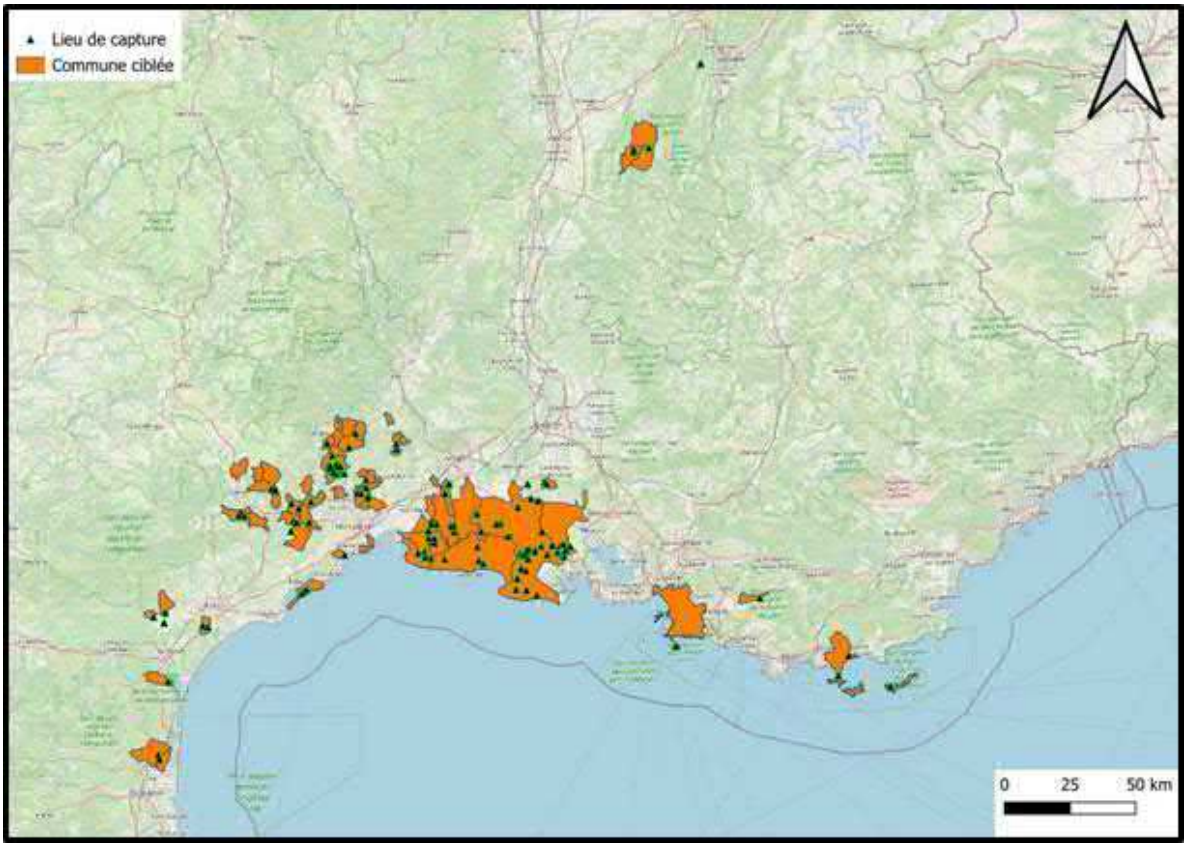


Figure 2 : Répartition des sites de captures d'oiseaux. Les triangles verts représentent les sites de captures et les secteurs orange les communes

2.4 Méthodes de traitements et d'analyse des données

2.4.1 Zone d'étude

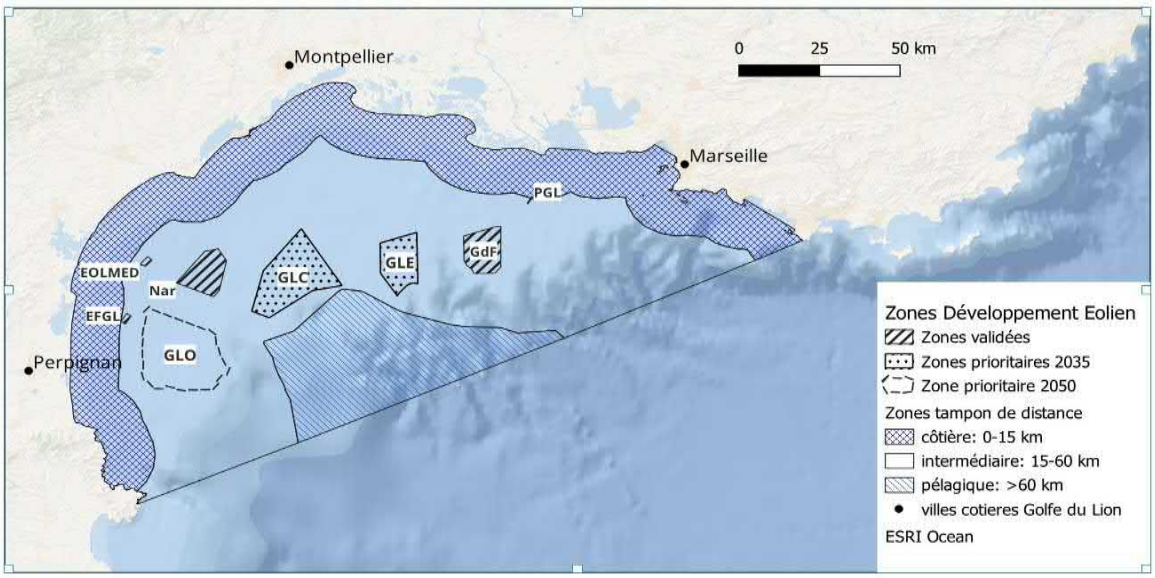


Figure 3 : Représentation des Zones de développement éolien (ZDE) dans l'emprise du golfe du Lion, différenciant la bande côtière 0-15 km et la zone pélagique (au-delà de 60 km).

2.4.2 GPS sur les oiseaux marins

Nous avons 1) caractérisé l'utilisation spatiale du golfe du Lion par les trois espèces marines, 2) identifié les zones d'alimentation, de transit, et de repos dans le golfe du Lion, 3) évalué l'effet des conditions de mer (vents et vagues) sur le budget d'activité des oiseaux, 4) modélisé la distribution des hauteurs de vol en tenant compte de l'effet des conditions marines, et 5) inféré le temps passé à hauteur de pales d'éoliennes en mer (**Figure 4**).

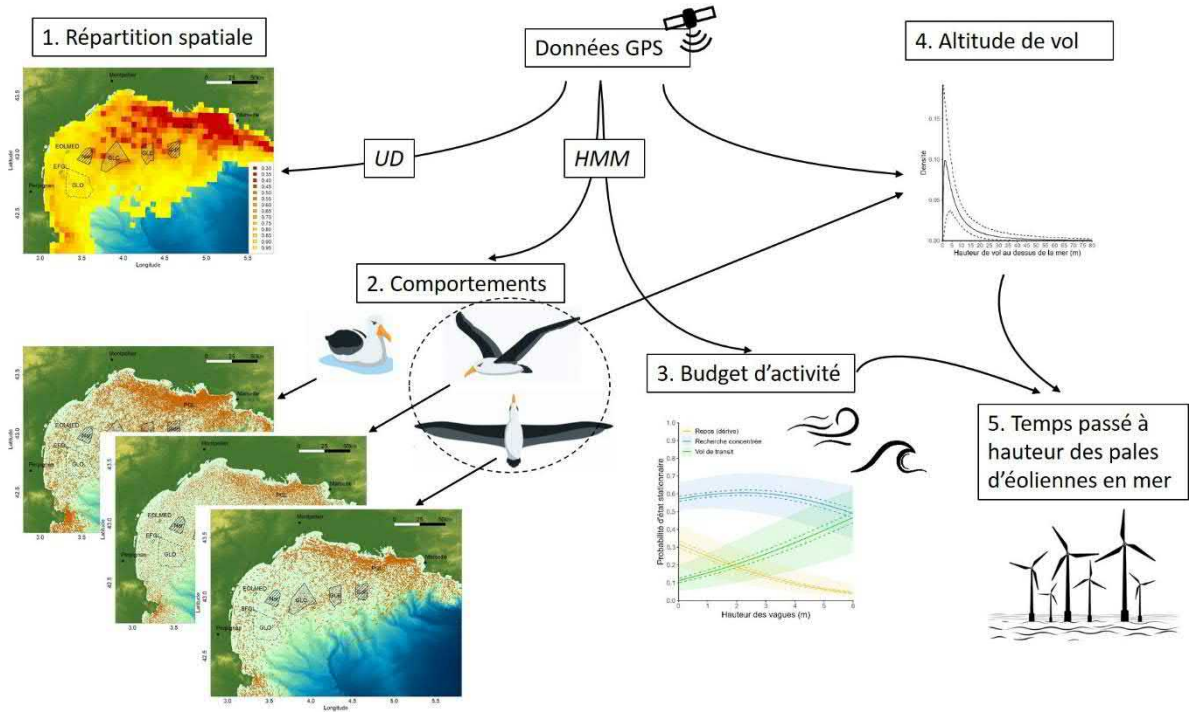


Figure 4 : Schéma synthétique du processus d'analyse des données collectées par les balises GPS des oiseaux marins. Les numéros font référence aux 5 étapes d'analyse détaillées dans le texte.

▶ Étape 1 : Caractérisation de l'utilisation de l'espace

Afin de déterminer les zones les plus fortement utilisées pour chaque espèce, nous avons estimé la distribution d'utilisation (UD) des oiseaux en utilisant la méthode du *biased random bridge* (BRB, Benhamou 2011). La méthode du BRB permet de considérer l'autocorrélation spatio-temporelle des localisations pour un même individu. Nous avons considéré que les localisations sont indépendantes entre chaque individu et avons estimé un UD par individu avec une grille de maille de 5000 x 5000 m pour l'ensemble du golfe du Lion et du Bassin Méditerranéen Occidental. Chaque UD individuel a été paramétré avec les critères suivants : Tmax = 3700 secondes (temps entre deux localisations pour qu'elles soient considérées indépendantes), Lmin = 50 m (distance minimum pour qu'un individu soit considéré comme s'étant déplacé), et un hmin = 2000 m. L'UD a été modélisé avec le package R *adehabitatHR* (Calenge 2006). Nous avons finalement calculé un UD populationnel en faisant une moyenne pondérée des UDs individuels, de manière que les individus ayant été suivis peu longtemps aient un poids plus faible que ceux suivis longtemps (voir par exemple les détails pour les puffins de Scopoli dans Courbin et al. 2024).

▶ Étapes 2 et 3 : Identification des phases comportementales et budget d'activité

Nous avons caractérisé les zones d'alimentation, de repos et de transit des trois espèces marines dans le golfe du Lion. Nous avons identifié trois états comportementaux en utilisant des modèles de Markov cachés (« hidden Markov models », HMM, Morales et al., 2004; Langrock et al., 2012). Les HMMs modélisent des séries temporelles à changement d'états et considèrent explicitement l'autocorrélation des localisations. Nous avons ajusté les HMMs sur les localisations collectées toutes les 10 min, en utilisant le package R *momentuHMM* (McClintock & Michelot, 2018). Nous avons comblé les trous dans la série temporelle avec une interpolation linéaire lorsqu'il y avait au maximum deux

localisations manquantes consécutives. Sinon les données manquantes marquaient la séparation entre deux séquences indépendantes. Chaque séquence durait au moins 30 min (soit 3 localisations). Nous avons considéré la longueur du pas (i.e., distance Euclidienne entre deux localisations GPS consécutives) issue d'une distribution Gamma et l'angle de rotation entre deux pas (i.e., le changement d'orientation entre le pas précédent et le pas actuel) issue d'une distribution de von Mises, pour distinguer les trois états comportementaux latents des oiseaux. Typiquement, ces trois états sont le repos à la surface de l'eau pour les puffins ou sur des structures flottantes pour les sternes, la recherche par aire-concentrée pour s'alimenter et le vol de transit (Courbin et al., 2018; Lane et al., 2019; Clay et al., 2020).

Pour chaque espèce, nous avons modélisé les HMMs en deux étapes comme recommandé par McClintock & Michelot (2018) quand on inclut des prédicteurs (i.e. ici le vent, les vagues, l'heure de la journée). Premièrement, nous avons évalué un HMM sans covariable pour obtenir les valeurs de départ qui donnent les meilleures estimations de la distribution de longueur des pas et d'angle de rotation. Nous avons considéré l'identifiant de l'individu en effet fixe sur les probabilités de transition entre états. Ensuite, nous avons réajusté le HMM avec les meilleures valeurs de départ des paramètres et en incluant comme prédicteurs l'heure de la journée (variable cyclique), la vitesse du vent à 10 m au-dessus du niveau de la mer (m/s), la direction du vent (variable cyclique), la hauteur significative des vagues (⅓ supérieur de la distribution des hauteurs de vagues, en m) et la période des vagues (en sec) sur les probabilités de transition entre états, en plus de l'identifiant de l'individu. Les valeurs de vitesse et de direction des vents ont été calculées à partir des données disponibles au *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) *ERA5 reanalysis* (E. U. Copernicus Marine Service Information, 2024) avec une résolution de 10 km. Les données des vagues sont issues de *Mediterranean Sea Waves forecasting system* (Med-WAV) avec une résolution de 4.2 km (E. U. Copernicus Marine Service Information, 2024). La séquence d'états la plus probable a été calculée avec l'algorithme de Viterbi (McClintock & Michelot, 2018).

Finalement nous avons inféré l'effet des conditions de mer sur le budget d'activité au niveau de la population. Nous avons calculé les probabilités d'états stationnaires avec leurs erreurs standards pour chaque individu et prédicteur. Puis, pour chaque espèce, nous avons calculé la moyenne populationnelle comme la moyenne des prédictions individuelles pondérée par l'inverse du carré de leur déviation standard. Afin de considérer l'hétérogénéité inter-individuelle, nous avons calculé la distribution à 95% des prédictions individuelles. La moyenne populationnelle, son intervalle de confiance à 95% et la distribution à 95% des prédictions individuelles pour les trois états ont été normalisées.

▶ Étape 4 : Modélisation des hauteurs de vol

Les données de hauteur de vol estimées par GPS étant peu précises dans notre cas, nous avons utilisé un modèle espace-état dans un cadre Bayésien pour corriger le biais de mesure d'altitude par GPS (Ross-Smith et al. 2016). Nous avons utilisé uniquement les données identifiées par les HMMs comme n'étant pas au repos, et avec une vitesse au sol > 1.1 $m.s^{-1}$. Nous avons exclu les 1% inférieurs et supérieurs de la distribution d'altitude pour réduire le biais d'estimation de la variance d'erreur d'observation. Le modèle espace-état considère chaque mesure d'altitude par GPS comme une observation avec une erreur, et dépend de la vraie distribution des altitudes de vol (processus biologique) et de la distribution des observations (processus d'erreur). Nous avons considéré qu'une

distribution Gaussienne des erreurs d'observation en partie expliquée par la valeur du HDOP (horizontal dilution of precision, Ross-Smith et al. 2016). Les mesures avec un faible HDOP ont une meilleure précision. Nous avons considéré que la distribution des vraies altitudes de vol suivait une loi Log-Normale (Johnston et al., 2014; Ross-Smith et al., 2016). Nous avons testé un effet de la vitesse du vent (variable continue), de la direction relative du vent (variable catégorique: vent de face, vent de côté et vent de dos [la référence]), et de la hauteur des vagues (variable continue) sur la hauteur de vol des oiseaux. La vitesse du vent et la hauteur des vagues étaient fortement corrélées ($r > 0.7$) pour les puffins, et nous avons ajusté deux modèles distincts. Voir détails méthodologiques en **Annexe 1**.

▶ Étape 5 : Temps passé à hauteur des pales d'éoliennes en mer

Si l'on combine le temps passé en vol (i.e. le temps passé en recherche alimentaire et en vol de transit (étapes 2 et 3) ajustée par la vitesse instantanée enregistrée par GPS car les oiseaux n'étaient pas toujours en vol dans ces deux états comportementaux), en fonction de l'heure de la journée et des conditions marines, avec la probabilité de voler au-dessus d'une certaine altitude (étape 4), on peut en déduire la proportion de temps passé dans l'enveloppe verticale à hauteur des pales d'éoliennes en mer laquelle est corrélée avec le risque de collision (Gauld et al. 2022; Millon et al. 2025).

2.4.3 GPS sur les grands oiseaux migrateurs terrestres

Pour l'analyse des données, nous avons défini un vol migratoire comme un trajet entre un site de reproduction et un site d'hivernage. La plupart des vols migratoires prénuptiaux ont lieu au printemps du Sud vers le Nord, du continent africain vers l'Europe, tandis que les vols migratoires de retour post-nuptiaux ont lieu à l'automne du Nord vers le Sud, de l'Europe vers l'Afrique. Cependant, certaines espèces ont un schéma migratoire qui ne suit pas ces règles générales (exemple ibis falcinelle, flamant rose, mouette mélanocéphale… où certains individus effectuent des migrations Nord-Sud en fin de printemps, et Sud-Nord en automne-hiver), qui compromettent une utilisation claire des termes saisonniers "prénuptial" et "postnuptial". En conséquence, pour la suite de ce rapport, les types de direction de vol migratoire seront étiquetés comme "Nord-Sud" et "Sud-Nord" à la place de "post-nuptial" et "pré-nuptial".

▶ Traitement par espèce

Pour chaque espèce nous avons synthétisé les résultats de la traversée du golfe du Lion dans des "fiches espèces", présentées en **Annexe 2** de ce rapport, et un exemple en **Figure 5**. Ces fiches espèces présentent 6 graphiques. Les deux graphiques supérieurs sont une vue cartographique des vols migratoires au-dessus du golfe du Lion, avec un code couleur présentant les classes de hauteur de vol (**Figure 5**). Les deux graphiques intermédiaires représentent la répartition en pourcentage (%) de points passés selon leur altitude de vol (en m) pondérés par leur durée, ce qui signifie que l'altitude d'un point est pondérée par la durée entre celui-ci et le point précédent. Par exemple, si une durée de 10 min est observée entre un point d'altitude à 15 m et le suivant d'altitude à 100 m, alors 10 points seront comptés dans la catégorie correspondante aux 100 m d'altitude. Enfin, les deux graphiques inférieurs représentent la répartition en pourcentage (%) de points selon leur distance à la côte (en km) pondérés par leur durée (comme précédemment). Les classes de distance à la côte "0-15 km", "15-60 km" et "> 60 km" ont été choisies pour séparer les zones de développement éolien (potentielles ou validées, regroupées sous le me ZDE) qui se situent dans la bande des "15-60 km" de la côte.

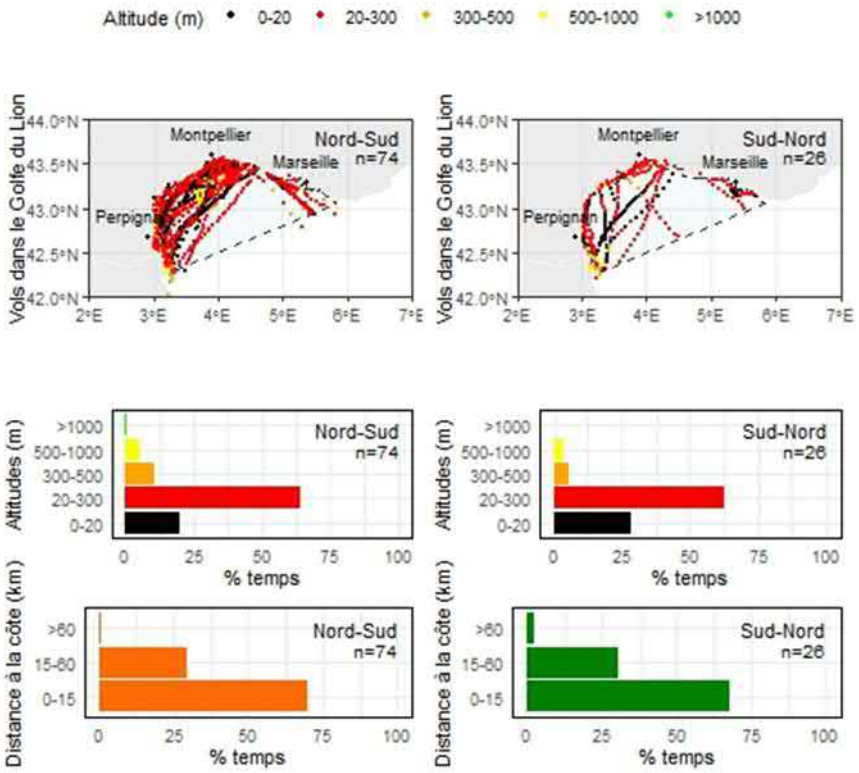


Figure *5* : exemple de fiche espèce pour la spatule blanche Platalea leucorodia

▶ Analyse générale des vols migratoires

Une première analyse statistique descriptive concerne les tendances de vols migratoires des espèces, où pour chaque direction de vol migratoire (Nord-Sud et Sud-Nord), les effectifs d'individus équipés, qui ont migré, et qui ont survolé le golfe du Lion ont été comptabilisés. Ces effectifs ont été exprimés en pourcentage par rapport au nombre total d'oiseaux équipés de balises. La récolte de ces informations sur leurs migrations se base sur les données compilées jusqu'au 08/05/2025.

La phénologie des déplacements migratoires est présentée en détail dans les fiches espèces, et brièvement présentée dans le corps du rapport. Nous présentons les dates moyennes, minimales et maximales de départ et d'arrivée pour chaque espèce et pour chaque direction de vol (nord-sud et sud-nord).

▶ Franchissement du golfe du Lion

La caractérisation du franchissement du golfe du Lion a été étudiée à deux niveaux.

Nous avons d'abord décrit les stratégies de vol empruntées lors du survol du golfe. Quatre stratégies de vol ont été définies (**Figure 6**). La stratégie "Terre" s'appliquait aux oiseaux rejoignant le détroit de Gibraltar sans survoler la mer auparavant. La stratégie "Longe-côte" concernait les oiseaux contournant la côte méditerranéenne par le littoral, en restant dans la bande des 5 km de la côte. La stratégie "Diagonale" concernait les oiseaux prenant un raccourci par-dessus le golfe du Lion en traversant la mer selon une direction nord-est / sud-ouest pour rejoindre le Cap de Creus, en Espagne (et vice-versa). Enfin, la stratégie "Direct mer" concernait les individus quittant la côte par une

trajectoire plus ou moins perpendiculaire en direction de l'Afrique ou des îles italiennes (Sardaigne). Une catégorie "Incertain" a été ajoutée pour comptabiliser les stratégies de vol migratoire qui ne correspondaient pas aux catégories prédéfinies, par exemple par manque de données télémétriques ou qui présentaient des caractéristiques de plusieurs stratégies.

Ensuite nous avons calculé la proportion de chaque stratégie pour chaque espèce en divisant le nombre total de vols de chaque stratégie par le nombre total de vols pour l'espèce. Nous avons exclu le faucon d'Éléonore (*Falco eleonorae*) qui ne présente aucun vol au-dessus du golfe. Pour cette dernière espèce, le choix de l'étudier provenait des observations régulières de cette espèce rare et menacée sur le littoral languedocien au printemps et en été, laissant supposer des traversées fréquentes du golfe du Lion.

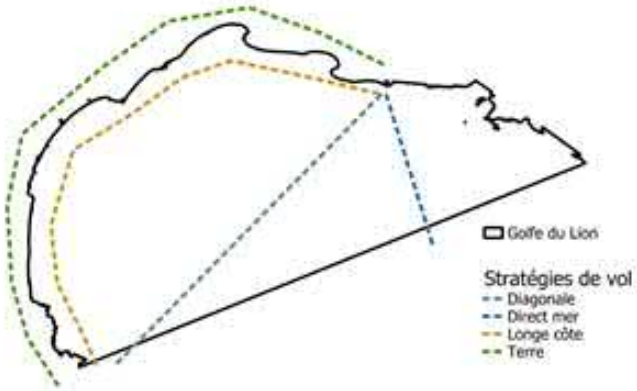


Figure *6* : Stratégies de vol migratoire au-dessus du golfe du Lion

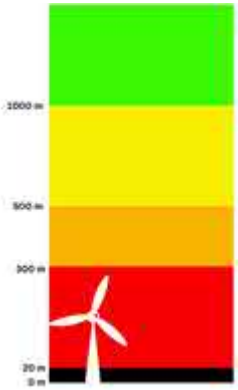


Figure *7* : Catégories d'altitudes choisies pour une éolienne prévue d'environ 300 m de haut, hauteur représentative pour les éoliennes des futurs parcs commerciaux

La deuxième étape consistait à quantifier la distance parcourue dans le golfe du Lion et notamment au-dessus des ZDEs (Figure 3). Pour les balises Ornitela présentant des *burst*s, une opération de sous-échantillonnage a été réalisée en ramenant le burst à un seul point avec comme valeur d'altitude la moyenne des valeurs d'altitude de tous les points composant ce burst, pour améliorer la précision de l'altitude. Chaque séquence de points successifs a été convertie en ligne et croisée avec la couche comprenant les différentes ZDEs et bandes côtière, intermédiaire et pélagique (Figure 2). Ceci a permis d'attribuer chaque entité linéaire à une zone ou une ZDE, puis de calculer la longueur des segments. Pour chaque espèce, nous avons regroupé les données de tous les individus et nous avons additionné les longueurs de tous les segments dans chacune des zones. Les longueurs totales par zones ont été converties en pourcentage de distance parcourue dans chaque zone, relativement à la somme totale des distances parcourues par tous les individus de l'espèce. Pour analyser la fréquentation de chaque ZDE, nous avons calculé le pourcentage de distance parcourue dans chaque ZDE relativement à la somme des distances dans la zone intermédiaire totale (incluant les ZDE).

▶ Hauteurs de survol du golfe du Lion

La troisième analyse s'intéresse aux hauteurs de vol moyennes dans la zone intermédiaire et dans les ZDE. Pour chaque espèce et pour chaque direction de migration, nous avons calculé une moyenne et écart type de hauteur de vol de toutes les positions collectées en vol, en nous concentrant sur la zone marine intermédiaire (15-60 km) et en séparant les localisations dans les ZDE et celles hors des ZDE. Cinq classes de hauteur de vol ont été définies (*Figure* 7). Une analyse plus précise des hauteurs de vol, tenant compte des incertitudes a été réalisée par l'analyse globale du lot 6, nous ne la détaillons pas ici.

2.4.4 GLS sur les petits oiseaux terrestres

Nous avons utilisé une méthode de géolocalisation basée sur les enregistrements de pression atmosphérique par les GLS, mise en œuvre à l'aide du package R *GeoPressureR* (Nussbaumer et al. 2023a, b) (*Figure* 8). Cette approche a permis d'estimer la position des oiseaux en identifiant des périodes dites « stationnaires », durant lesquelles l'oiseau restait localisé dans une même zone au cours de sa migration (correspondant à une halte migratoire, à une résolution variant de 10 à 100 km). Ces périodes ont été délimitées en identifiant les phases de vol migratoire qui présentaient une chute de pression caractéristique (inversement proportionnelle à l'altitude de vol) associée à une augmentation de l'activité (vol prolongé). Des exemples concrets sont consultables à l'adresse suivante : https://raphaelnussbaumer.com/GeoPressureManual/. Pour chaque période stationnaire, la série temporelle de pression a été extraite, nettoyée, puis confrontée à la base de données météorologiques globales ERA5, qui fournit des données horaires de pression atmosphérique au sol sur l'ensemble du globe (https://www.copernicus.eu/en/esri-inc). La comparaison entre les profils temporels a permis de générer des cartes de vraisemblance spatiale. L'estimation de l'altitude, dérivée de la pression, a été utilisée pour restreindre l'intervalle d'altitudes possibles et affiner les localisations. Ces données ont ensuite été intégrées dans un modèle de Markov caché, qui a permis de reconstituer la trajectoire migratoire la plus probable, d'estimer la durée des vols, et de produire des trajectoires simulées. L'intégration de données sur la vitesse du vent (issues également d'ERA5) a également permis de mieux modéliser l'effet des courants aériens sur les déplacements. Par ailleurs, la méthode a permis de localiser des escales de très courte durée (moins d'un jour), souvent indétectables par d'autres techniques, ainsi que de suivre les variations d'altitude avec une précision d'environ 10 mètres.

En raison de l'imprécision géographique inhérente à la géolocalisation par pression, il n'est pas possible d'identifier avec certitude l'ensemble des vols ayant potentiellement traversé le golfe du Lion. De nombreux petits oiseaux migrateurs quittant le sud de la France pour rejoindre l'Afrique longent les côtes françaises puis espagnoles, mais cette technique ne permet pas de déterminer précisément si leurs trajectoires passent au-dessus de la mer ou au-dessus de la terre. Nous avons donc restreint notre analyse aux seuls cas pour lesquels nous disposons d'un niveau de confiance élevé indiquant un vol au-dessus d'une étendue marine. Ces cas correspondent donc à des individus pour lesquels deux périodes stationnaires bien définies ont été détectées de part et d'autre de la mer Méditerranée, soit depuis les côtes françaises, soit depuis le nord de l'Espagne et ce jusque sur les côtes africaines. Il s'agit donc majoritairement de vols directs, de longue durée (plusieurs heures), caractéristiques d'une traversée maritime. Nous avons également inclus les vols entre la France et l'Espagne (continentale) et les îles Baléares, observés aussi bien au printemps qu'à l'automne.

À partir de ces vols, le relevé de la pression (à intervalles de 5 ou 20 minutes selon le modèle de GLS) a permis d'estimer l'altitude en vol pendant la traversée. Nous avons considéré que ces vols longs et directs constituaient une base représentative pour évaluer les altitudes et les stratégies de franchissement d'une barrière marine utilisées par les petits oiseaux migrateurs généralisable au cas de la région du golfe du Lion. Ces données ont ensuite été utilisées pour estimer le risque potentiel d'interactions avec les installations éoliennes en mer.

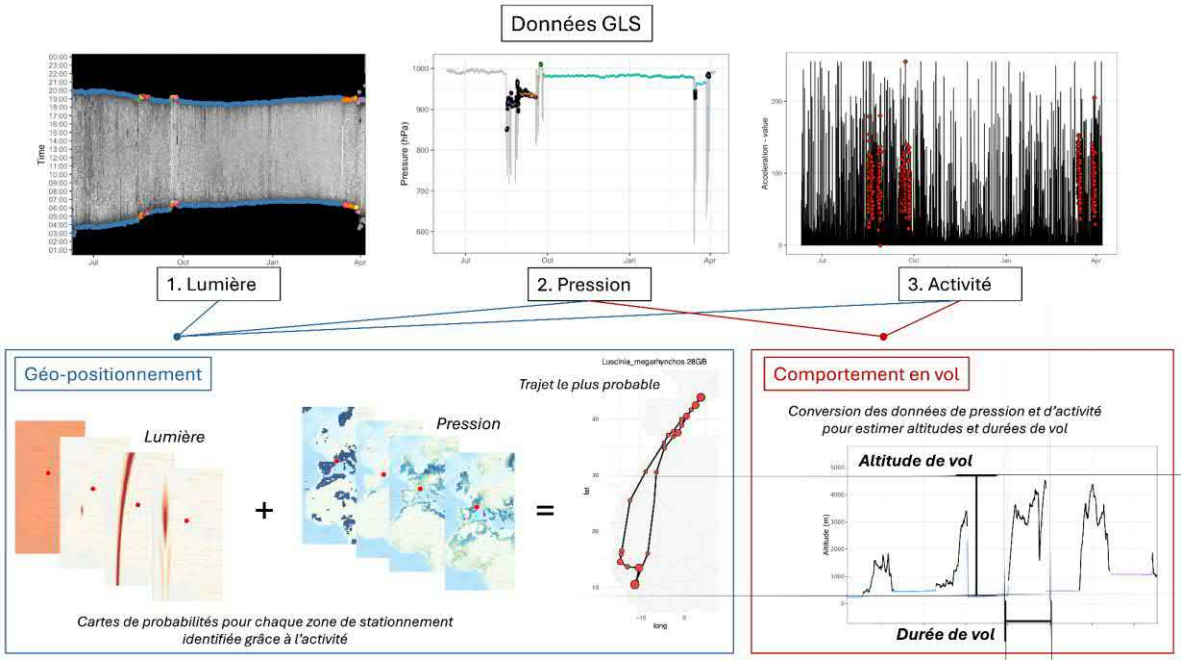


Figure *8 :* Schéma synthétique du processus d'analyse des données GLS pour les petits oiseaux terrestres. Les données GLS (lumière, pression et activité) ont été utilisées, dans un premier temps, pour déterminer la position des oiseaux au cours de leur cycle migratoire, puis dans un second temps, pour étudier leurs comportements de vol lors des traversées marines (notamment grâce à la pression et l'activité).

3. Résultats et discussions

3.1 Description des campagnes d'acquisition des données

3.1.1 Bilan 2021-2024

Bien que la décision d'octroi du marché n'ait été rendue que le 31 mars 2021, une rapide mise en œuvre a permis de capturer un total de 194 individus de 9 espèces différentes dont 92 individus (80 GLS + 18 GPS) et 76 individus ont servi de témoins pour GLS.

Le printemps/été 2022 a permis de mener la première campagne d'envergure. Un total de 151 balises GPS et 197 GLS ont été déployés, et 9 individus équipés de GLS en 2021 ont été recapturés, dont 7 avec leurs GLS. Le printemps/été 2022 a été marqué par des conditions très sèches et une migration tardive qui a eu pour conséquence de diminuer grandement le nombre d'individus disponibles à la

capture. Ainsi plusieurs espèces, telles que les hérons pourprés, qui étaient programmées pour l'année 2022 ont été rares et leurs captures reportées à l'année 2023. En 2022, la mouette mélanocéphale n'a pas pu être équipée à cause d'échecs massifs de reproduction sur les colonies envisagées du fait d'épidémies d'influenza aviaire. Une échasse blanche a été équipée à titre expérimental en 2022 mais la charge de terrain n'a pas permis non plus d'équiper davantage d'individus de cette espèce qui a été reportée à l'année 2023.

En 2023, 226 GPS et 50 GLS ont été posés. Le travail de recherche et recapture des 298 GLS posés en 2021 et 2022 a permis de retrouver 57 individus équipés de GLS (soit 19% de recapture, ce qui représente un taux très élevé pour des passereaux), dont 45 avec leur GLS. La météorologie de la saison 2023 a été marquée par un hiver et un printemps très sec, générant un assèchement précoce et intense de l'essentiel des zones humides hors de la Camargue. Certaines espèces cibles ont donc connu un mauvais succès de reproduction (blongios nain, rousserolle turdoïde), y compris la glaréole à collier sur certaines colonies comme sur le Domaine de la Tour du Valat où la reproduction a été un échec. Pour la seconde année, une pandémie de grippe aviaire a touché massivement les laro-limicoles, mettant en échec de nombreuses colonies, avec une forte mortalité des adultes et des jeunes. Ainsi plusieurs espèces telles que la sterne caugek, la mouette mélanocéphale ou le goéland railleur n'ont pas pu être ciblées comme prévu, avec un nouveau report des opérations sur la mouette mélanocéphale en 2024. En revanche la sterne hansel, espèce non prévue initialement, s'est révélée facile à capturer incidemment lors d'opérations prévues sur les hérons, et a donc été ajoutée à la liste des espèces. Concernant le déploiement des 50 derniers GLS, deux nouvelles espèces ont été ciblées : l'hirondelle de fenêtre et le pipit des arbres.

En 2024, 131 GPS ont été posés répondant ainsi aux engagements du programme. 14 individus supplémentaires avec leurs GLS ont été récupérés. La météorologie de la saison 2024 contrairement aux années précédentes a été marquée par un printemps plutôt pluvieux. Cela a provoqué l'échec d'installation de la glaréole à collier dans un premier temps mais elle s'est ensuite bien reproduit et 13 captures ont pu être réalisées. Un large effort a été réalisé sur les espèces qui avaient subi la grippe aviaire l'année précédente : ainsi 32 goélands railleurs ont été équipés et 20 mouettes mélanocéphales. Aucun effort n'a été réalisé sur les hérons pourprés car les conditions n'étaient pas favorables (pas de reproduction dans les arbres et dérangement trop important en roselière sur les adultes). Le détail de toutes les manipulations et retours d'expériences est disponible sur demande aux auteurs de ce rapport.

Les saisons d'hiver ont été dédiées à la planification des opérations de capture pour les printemps suivants, avec la commande des équipements, à la recherche des sites de capture, aux soutiens humains potentiels et aux recrutements des aides bagueurs, et aux démarches administratives ainsi que la gestion des données, ainsi qu'au rattrapage du temps de travail de la saison de terrain.

3.1.2 Ajustements des espèces

Les captures des puffins des Baléares, initialement prévues en mer dans le golfe du Lion, ont été annulées en raison des difficultés de capture. En effet l'espèce se reproduit aux Îles Baléares et seule une petite partie, non identifiable, des individus fréquente le golfe du Lion. Les captures en mer testées par le CEFE et l'OFB dans le cadre du Plan National d'Action (PNA) pour le puffin des Baléares (porté par l'OFB) ont été réalisées avec succès en août 2022, 2023 et 2024 dans le Mor Braz Baie de

Douarnenez et Saint-Brieuc (90 individus capturés). Cependant, la maturité de la technique de capture en mer arrivant trop tard par rapport au calendrier de MIGRALION, l'équipement des puffins des Baléares a été abandonné dans le cadre du projet.

Le projet d'équiper des océanites tempête a été abandonné pour deux raisons. D'abord les colonies nicheuses en France sont trop réduites et difficiles d'accès pour un déploiement de balises en toute sécurité pour les oiseaux et la population. Ensuite, de nouveaux résultats nous sont parvenus des grosses colonies en Espagne (Baléares, Benidorm). Des chercheurs espagnols nous ont informé que pratiquement tous leurs oiseaux utilisent majoritairement le sud de la Méditerranée et évitent globalement le golfe du Lion. Ainsi il nous a semblé peu judicieux d'investir du temps et de l'énergie à équiper des oiseaux qui n'auront qu'une faible probabilité de fréquenter le golfe du Lion.

Le Courlis corlieu s'est avéré très difficile à capturer dans la région méditerranéenne et cette espèce a été retirée de la liste des espèces cibles. Il avait été envisagé d'équiper des pie-grièches écorcheurs et des torcols fourmiliers mais la charge de terrain sur les passereaux était déjà très importante et ces espèces ont été retirées.

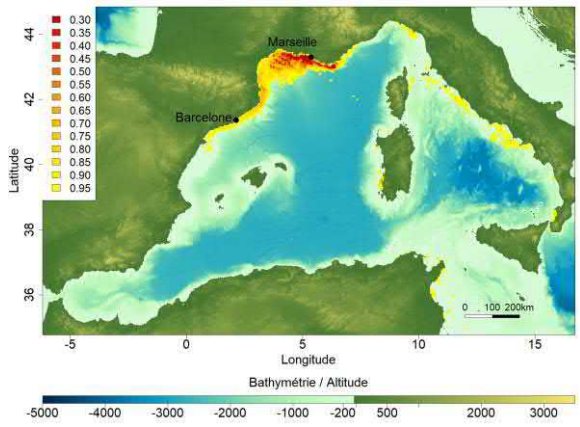
Les balises *Icarus* initialement considérées pour l'équipement d'oiseaux ne permettaient finalement pas d'obtenir une fréquence d'acquisition GPS élevée. De plus, le système a été suspendu depuis la guerre en Ukraine en février 2022. Elles ont donc été très rapidement abandonnées malgré la pose de deux balises en 2021.

3.2 Résultats Oiseaux marins

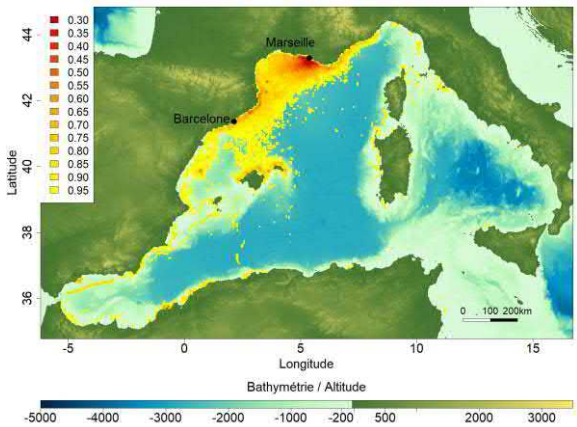
3.2.1 Répartition spatiale des oiseaux marins

A l'échelle du bassin occidental méditerranéen, les puffins yelkouans, les puffins de Scopoli et les sternes caugek ont utilisé essentiellement le golfe du Lion pendant la période de reproduction (**Figure 9**). Les puffins yelkouan et les puffins de Scopoli ont utilisé aussi largement les côtes catalanes pendant la saison de reproduction. En fin de saison de reproduction, lorsque les oiseaux quittaient les colonies, les oiseaux fréquentaient les côtes italiennes et espagnoles, la Corse, la Sardaigne et les côtes d'Afrique du Nord. Les puffins de Scopoli fréquentaient la mer des Baléares avant de partir en migration en Atlantique.

A



B



C

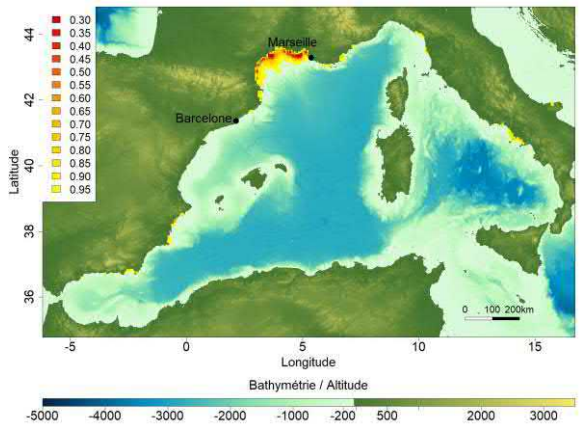


Figure 9 : Distribution d'utilisation (UD) (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek à l'échelle du bassin occidental méditerranéen

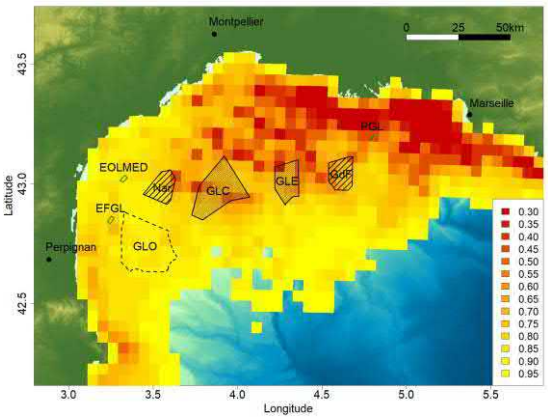
A l'échelle du golfe du Lion, le suivi télémétrique conduits sur trois à plus de 10 ans selon les espèces indique (Figure 10) :

- Une utilisation de l'ensemble du golfe du Lion par les deux espèces de puffins, plus pélagiques, mais avec une moindre fréquentation de la partie la plus occidentale (Figure 10 A,B),
- Une plus forte utilisation de la zone située à l'ouest du delta du Rhône par les puffins yelkouans par rapport aux puffins de Scopoli (Figure 10 A),
- Une forte concentration dans l'utilisation de l'espace situé autour des îles de Marseille par les puffins de Scopoli (Figure 10 B),
- Une utilisation de l'ensemble de la frange côtière par les sternes caugek (Figure 10 C),
- Le delta du Rhône et le golfe de Fos sont largement utilisés par les trois espèces,
- Les éoliennes pilotes, notamment PGL, sont situées dans des zones à fortes fréquentation par les oiseaux marins,

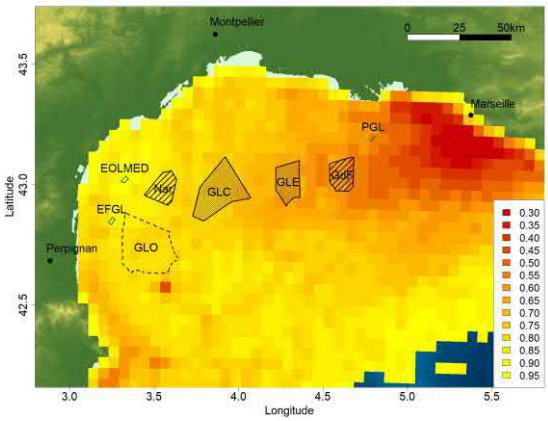
- Les zones prévues pour le développement éolien (Nar, GdF, GLC et GLE) chevauchent des aires fortement utilisées par les puffins, et dans une moindre mesure, par les sternes.

La répartition spatiale des trois espèces présentées ici est cohérente avec les résultats obtenus par intégration de données et présentés dans le **Lot 6**.

A



B



C

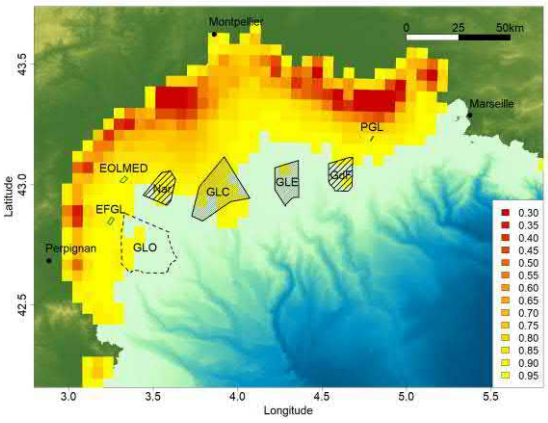


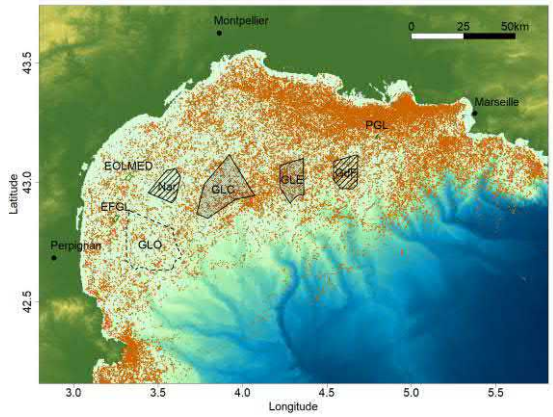
Figure 10 : Distribution d'utilisation (UD) (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek dans le golfe du Lion.

3.2.2 Répartition spatiale des différentes activités en mer dans le golfe du Lion

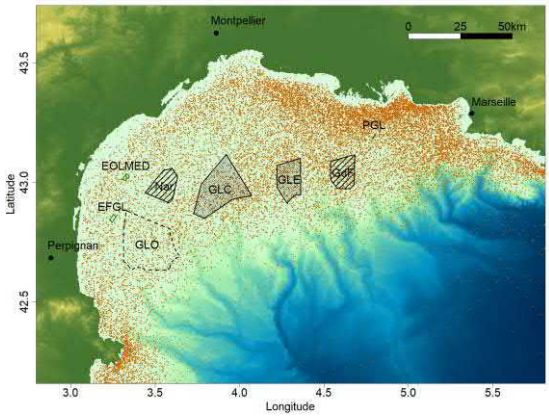
Les puffins s'alimentaient dans l'ensemble du golfe du Lion, mais certaines zones étaient plus fortement privilégiées, comme le golfe de Fos, le delta du Rhône et le Cap de Creus (**Figure 11A et 12A**). Le delta du Rhône, en plus de l'ensemble de la frange côtière, était également une zone d'intérêt pour l'alimentation des sternes (**Figure 3.13A**). Il y avait un fort chevauchement des zones d'alimentation avec certaines zones ciblées pour le développement éolien flottant. Les vols de transit avaient une répartition similaire aux zones d'alimentation (**Figure 3.11B, 3.12B et 3.13B**), de même que les zones de repos (**Figure 3.11C, 3.12C et 3.13C**), sauf pour les sternes qui ne se reposent pas à la surface de l'eau comme les puffins mais se posent à terre ou sur des structures émergées. Les puffins ont un comportement d'évitement généralement marqué par rapport aux éoliennes posées (Deakin et al., 2022). Les ZDEs sont donc susceptibles d'impacter négativement des zones d'alimentation et de repos

des puffins. Le comportement des puffins vis à vis des éoliennes flottantes n'est toutefois pas encore connu. Dans le cas d'une absence d'évitement ou d'une attraction des zones de parcs, les activités de recherche de nourriture et les vols de transit proches des turbines pourraient accroître le risque de collision. Cependant les puffins volent généralement proche de la surface de l'eau et le risque est probablement très limité. Les sternes, plus côtières, chevauchaient surtout les zones des fermes pilotes et les ZDEs (Nar et GdF) lors de leurs activités d'alimentation et de transit. Du fait de leur comportement de repos sur les structures flottantes, il est fort probable qu'elles utilisent les flotteurs comme reposoir.

A



B



C

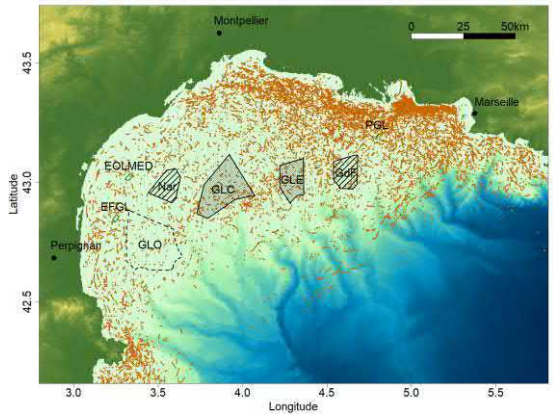
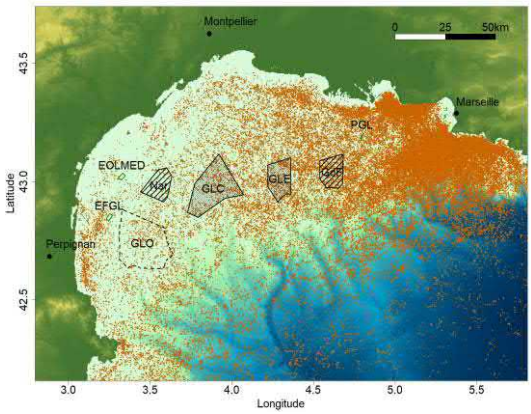
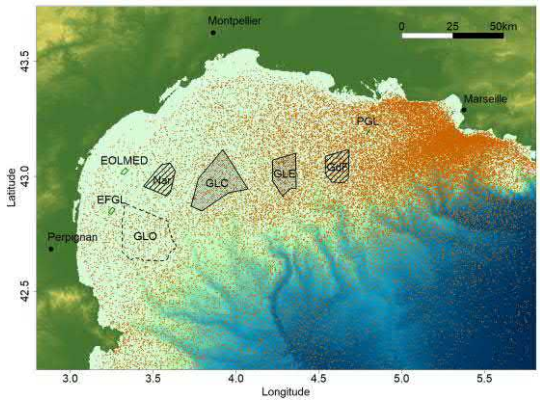


Figure 11 : Répartition spatiale des 31 puffins yelkouans suivis en 2022 et 2023, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, (B) de vol de transit , ou (C) de repos, dans le golfe du Lion.

A



B



C

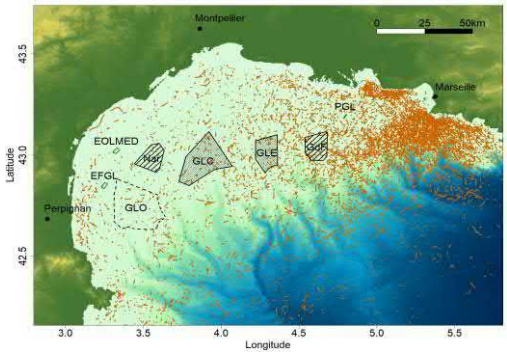


Figure 12 : Répartition spatiale des 40 puffins de Scopoli suivis en 2021 et 2022, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, (B) de vol de transit, ou (C) de repos, dans le golfe du Lion.

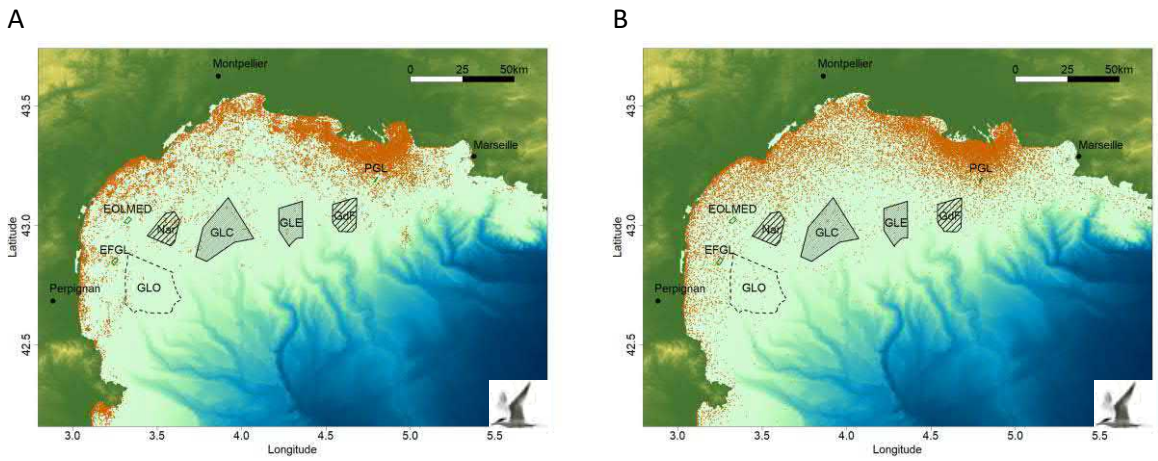


Figure 13 : Répartition spatiale des 26 sternes caugek suivis entre 2021 et 2023, pendant leurs phases (A) de recherche alimentaire, ou (B) de vol de transit dans le golfe du Lion. Les phases de repos étant quasiment exclusivement sur terre à la côte, elles ne sont pas représentées ici.

3.2.3 Budget d'activité

Les puffins ont un rythme circadien prononcé. Les puffins yelkouan se reposaient essentiellement à la surface de l'eau la nuit lorsqu'ils restaient en mer (75% de leur temps), alors que la journée, ils prospectaient pour s'alimenter (70%, Figure 14 A). Les puffins de Scopoli passaient peu de temps à se reposer en mer la nuit (< 20%) au profit de longs vols de transit (> 40%, Figure 14 B). Leur temps en recherche alimentaire se déroulait de nuit (> 40%) et de jour (60%). Au contraire, les sternes n'avaient pas de rythme circadien prononcé. Les sternes passaient à peu près autant de temps au repos qu'en recherche restreinte (~40%) et le reste en vol de transit, tout au long de la journée (Figure 14 C).

Le budget d'activité des trois espèces était largement influencé par les conditions marines. Les puffins yelkouan, les puffins de Scopoli et les sternes caugek passaient moins de temps à se reposer lorsque la vitesse du vent augmentait, et passaient plus de temps en vol de transit (Figure 14 D,E,F). Un comportement similaire était observé avec l'augmentation de la hauteur des vagues pour les trois espèces. Contrairement aux puffins, les sternes passaient beaucoup plus de temps en recherche alimentaire avec l'augmentation de la vitesse du vent, potentiellement dû à des difficultés de pêche à la surface de l'eau dans des conditions de forts vents et de vagues (Figure 14 F).

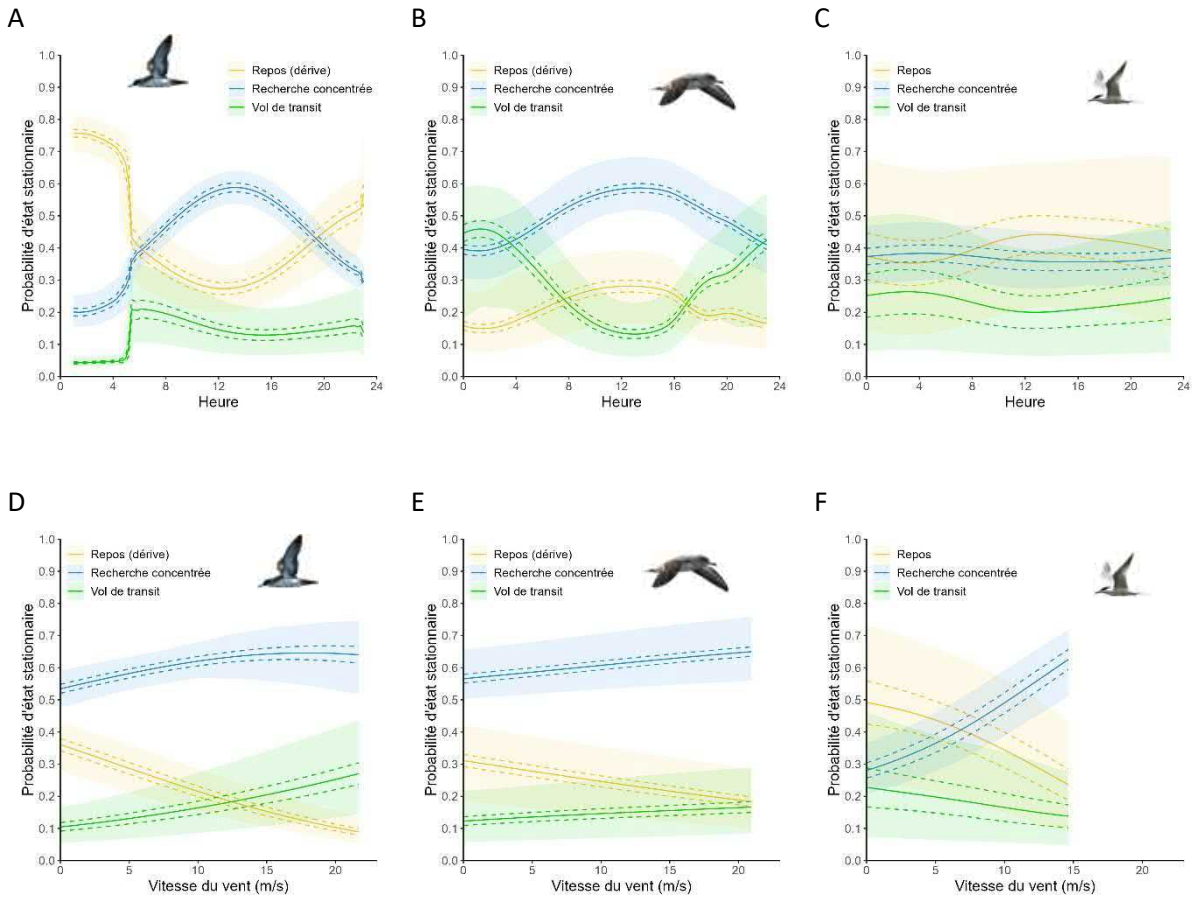


Figure 14 : Probabilité d'être au repos (jaune), en recherche alimentaire (bleu) ou en vol de transit (vert) pour (A,D) les puffins yelkouan, (B,E) les puffins de Scopoli et (C,F) les sternes caugek lorqu'ils sont en mer, en fonction de l'heure de la journée (A,B,C) et la vitesse du vent (D,E,F). La moyenne populationnelle (ligne continue) et son intervalle de confiance à 95% (ligne pointillée), ainsi que la distribution à 95% des prédictions individuelles (zone en transparence) sont indiquées.

3.2.4 Hauteurs de vol

Les modèles espace-état ont permis de modéliser la distribution de hauteur de vol des trois espèces (Figure 15). Les puffins yelkouans et les puffins de Scopoli volaient à une altitude moyenne de 1 m au-dessus du niveau de la mer (puffin yelkouan: moyenne = médiane = 1 m; puffin de Scopoli: moyenne = médiane = 1 m). Les sternes volaient plus haut, avec une altitude médiane de 6,8 m et une altitude moyenne de 14,2 m. Ces résultats étaient confortés par les distributions empiriques des données d'altitude relevées pour ces trois espèces par des observateurs en mer (cf. **Lot 4, Assali et al. 2025**)).

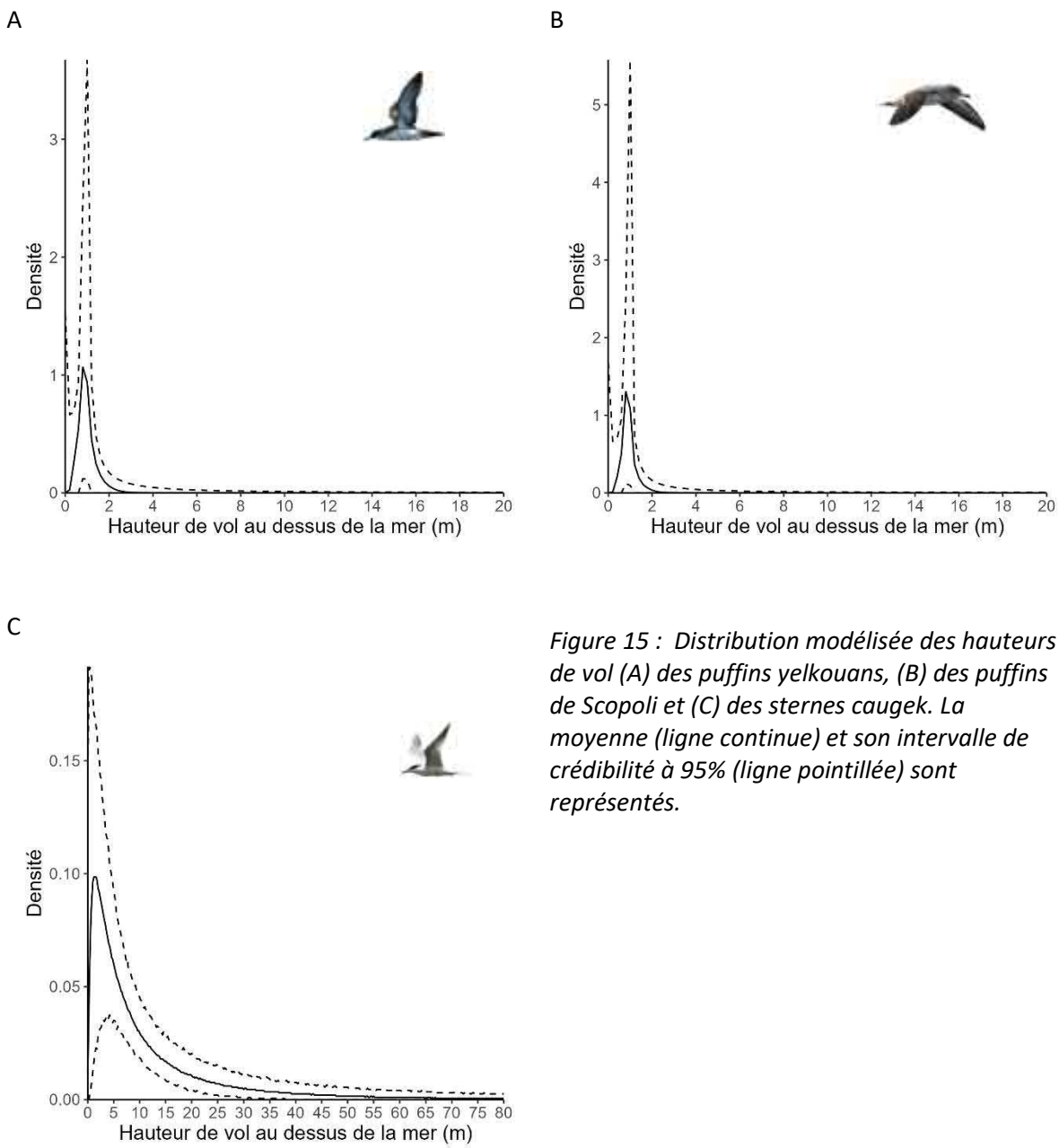


Figure 15 : Distribution modélisée des hauteurs de vol (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek. La moyenne (ligne continue) et son intervalle de crédibilité à 95% (ligne pointillée) sont représentés.

Les conditions marines influaient peu sur la distribution des hauteurs de vol des oiseaux, bien que nous ayons trouvé des effets significatifs de la vitesse du vent et de la hauteur des vagues sur les hauteurs de vol. Les puffins yelkouans et les puffins de Scopoli volaient 95% de leur temps en-dessous de 3 m, quelque soit les conditions de vitesse de vent (et de vagues), indépendamment de la direction relative du vent (Figure 16 A,B). Les sternes volaient plus bas lorsque la vitesse du vent augmentait, volaient plus haut avec un vent arrière (Figure 16 C). Leur hauteur de vol n'était pas affectée par la hauteur des vagues. Les sternes volaient 17% de leur temps au-dessus de 22 m, 11% au-dessus de 30 m, et 5% au-dessus de 50 m. Contrairement aux puffins, les sternes passaient un temps significatif à hauteur de pâle d'éolienne.

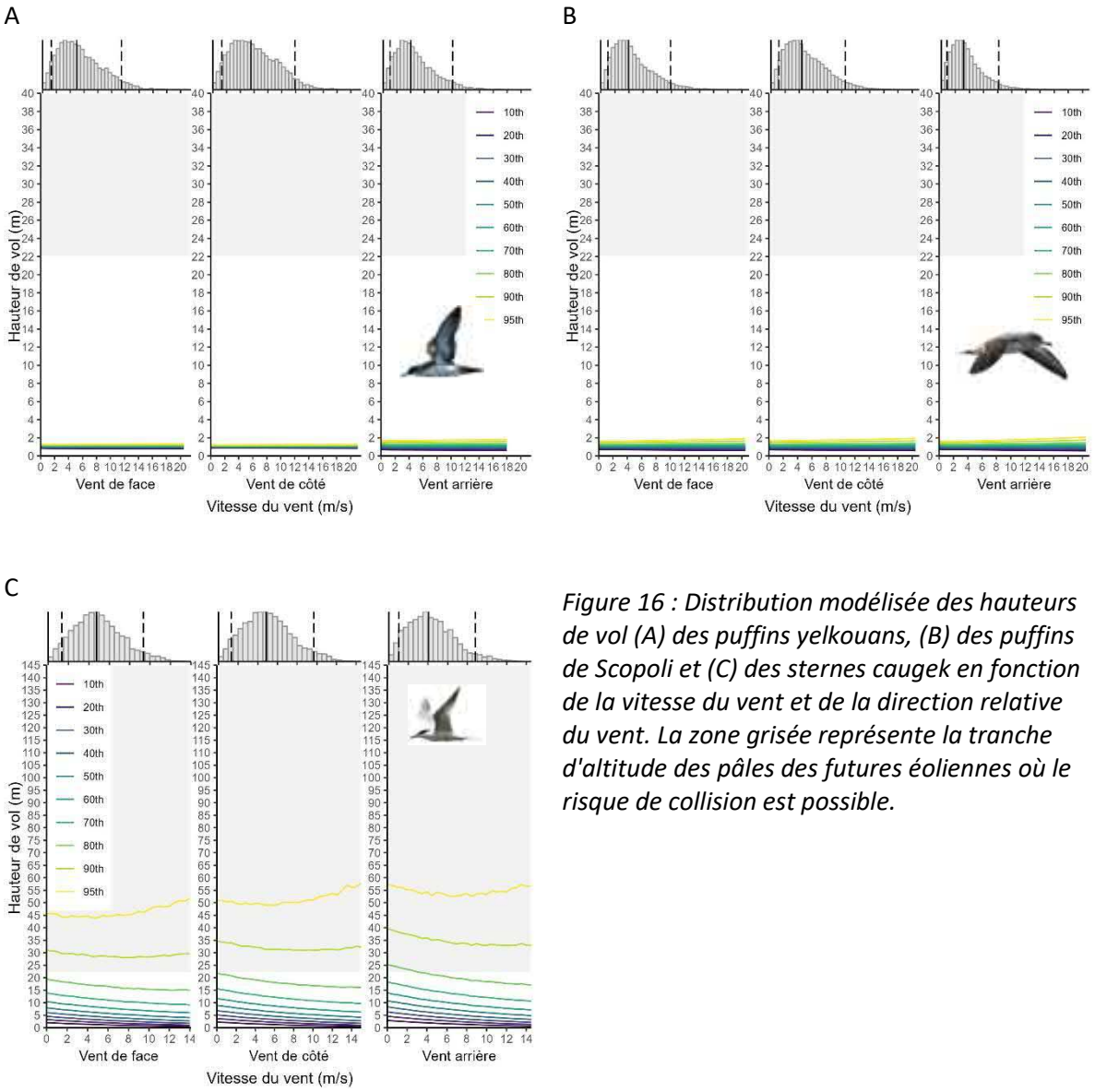


Figure 16 : Distribution modélisée des hauteurs de vol (A) des puffins yelkouans, (B) des puffins de Scopoli et (C) des sternes caugek en fonction de la vitesse du vent et de la direction relative du vent. La zone grisée représente la tranche d'altitude des pâles des futures éoliennes où le risque de collision est possible.

3.2.5 Temps passé à hauteur de pales d'éolienne

Le risque de collision est issu du produit du pourcentage de temps en vol à hauteur de pales, la manœuvrabilité en vol, le pourcentage de temps passé en vol, et un score d'activité nocturne (Furness et al. 2013). Ici, nous n'avons pas considéré la manœuvrabilité, mais étant donné que c'est un facteur constant dans le calcul du risque de collision, tout changement du temps passé en vol à hauteur de pales des futures éoliennes flottantes modifiera proportionnellement le risque de collision. Par conséquent, le risque de collision serait quasi-nul pour les puffins yelkouan et les puffins de Scopoli (Figure 17). En revanche, les sternes présentent un risque de collision plus important que les puffins du fait d'une hauteur de vol plus fréquemment dans l'emprise des pales (voir l'évaluation du risque de collision complète présentée dans le Lot 6). En effet, les sternes caugek passaient plus de 8% de leur temps au-dessus de 22 m lorsqu'elles sont en mer, dans des conditions moyennes de vents et de vagues, et plus de 9,5% de leur temps au-dessus de 22 m lorsque les conditions étaient ventées et la

mer houleuse. On observe une forte hétérogénéité autour de la moyenne (1 à 28%). Les sternes passaient plus de 5,3% de leur temps au-dessus de 30 m.

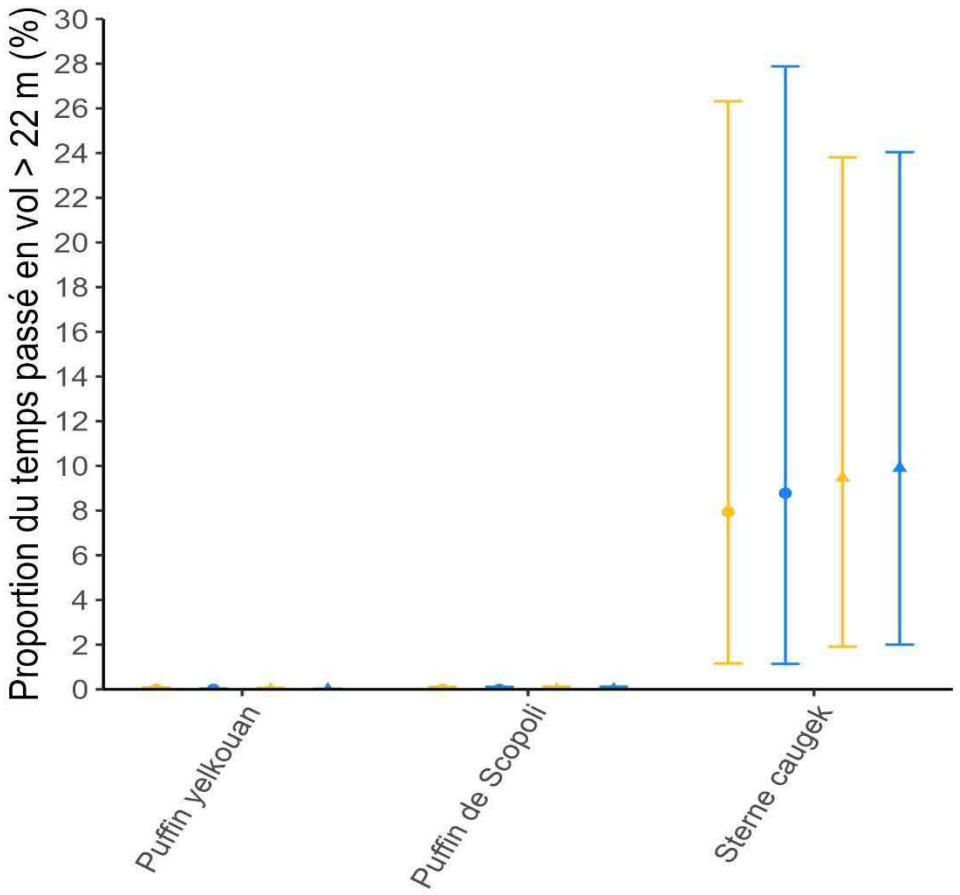


Figure 17 : Proportion moyenne du temps passé à voler à hauteur de risque de collision (> 22 m) durant la journée (jaune), et la nuit (bleu), avec son intervalle de confiance à 95%, pour des conditions marines moyennes (médiane de la distribution des vitesses de vents et hauteur de vagues, point) et pour des conditions de forts vents et de mer houleuses (95ème percentile, triangle) pour chaque espèce, ajustée pour les proportions de direction relative de vent par espèce.

3.2.6 Implications et perspectives

Nos résultats soulignent un chevauchement spatial significatif entre l'aire utilisée par les puffins yelkouan et les puffins de Scopoli pour s'alimenter, se reposer et pour transiter, et certaines fermes éoliennes pilotes et les futures zones dédiées au développement éolien flottant. De plus, les zones au large du golfe de Fos, du delta du Rhône et de la Camargue sont largement utilisées par les trois espèces étudiées ici, et représentent des zones de conflits potentiels importants pour la conservation de ces espèces. Selon l'adaptation ou non de ces oiseaux à cette perte d'habitat fonctionnel, l'impact pourrait être important. Il convient de noter que la distance inter-éoliennes est typiquement supérieure à 1 km, et peut atteindre jusqu'à 2 km. Si la présence de éoliennes mène à un abandon des zones par ces groupes d'espèces, la perte des zones d'alimentation pourrait impacter notamment la longueur de leurs trajets pour contourner les parcs et accéder à de nouvelles zones fonctionnelles. En

effet, les puffins peuvent souffrir d'effet de déplacement et des coûts énergétiques associés quand les parcs éoliens sont implantés au niveau des zones d'alimentation (Dierschke et al. 2016). Ce phénomène a été observé à l'échelle globale, aussi bien dans les eaux européennes (Deakin et al. 2022) que dans les eaux Pacifique du courant californien (Adams et al. 2017). Il est indispensable de poursuivre le suivi télémétrique post-installation des éoliennes pour étudier la réaction des oiseaux suite à l'implantation des parcs éoliens en mer méditerranée

Le risque de collision est en revanche quasi nul pour les puffins yelkouan et de Scopoli qui volent en-dessous de 3 m 95% de leur temps. Cela confirme les faibles hauteurs de vol également observées pour les puffins des anglais *Puffinus puffinus* et les puffins fuligineux *Ardenna grisea* (Deakin et al. 2022, Miller et al. 2025). Nos résultats sur les puffins yelkouan et de Scopoli viennent compléter un important manque d'information sur la distribution des hauteurs de vol des Procellariiformes, qui empêche actuellement d'informer correctement les modèles de risque de collision (Miller et al. 2025).

En revanche, **les sternes volent bien plus haut,** comme aussi observé en Mer du Nord (Fijn et Collier 2022), **et sont potentiellement plus exposées à un risque de collision**. **Il est nécessaire d'étudier en détail le comportement des sternes à proximité des éoliennes, qui pourraient de surcroît être attirées par ces structures marines pour s'y reposer.** Bien qu'un comportement d'évitement des parcs éoliens par les sternes caugek ait été observé sur les côtes du Norfolk au Royaume Uni (Thaxter et al. 2024), ce comportement n'est pas systématique et dépend des conditions locales d'alimentation (Dierschke et al. 2016).

•

3.3 Résultats Oiseaux terrestres (GPS)

3.3.1 Patron général de migration

Toutes les espèces équipées de balises GPS ont permis d'enregistrer des trajets migratoires, avec cependant de fortes disparités inter-espèces. Sur les 589 individus équipés dans le cadre de MIGRALION ou par des partenaires, 57% ont fourni des données de migration, avec un record pour la mouette mélanocéphale (95% de migrateurs). En revanche, la proportion des individus avec un suivi assez long pour enregistrer des migrations était minimale pour les plus petites espèces (18% pour le blongios nain, 30% pour la glaréole et 38% pour le rollier) (Figure 18). Ce faible nombre de migrations enregistrées peut être dû à la perte ou à la panne de balises, en particulier pour les modèles les plus petits qui sont plus fragiles. Les balises Ornitela se sont avérées plus robustes que les balises Interrex. Des ajustements sur les harnais ont été réalisés sur certaines espèces afin de prendre en compte les retours d'expérience durant le programme. Par exemple, les harnais en silicone ont été remplacés sur les glaréoles pour des harnais en Teflon plus robustes. Bien que prise en compte par des méthodes adaptées au maximum, on ne peut pas exclure que certaines espèces tolèrent difficilement des harnais et un poids supplémentaire, même faible, en particulier lors des remontées au printemps de zones d'hivernage en Afrique de l'Ouest, se traduisant soit par des échecs à la remontée, soit par des mortalités plus importantes. Des analyses sont en cours sur les espèces équipées de bagues lisibles à distance uniquement afin de comparer les taux de survie entre individus équipés et bagués seulement et d'analyser ainsi plus précisément ces aspects.

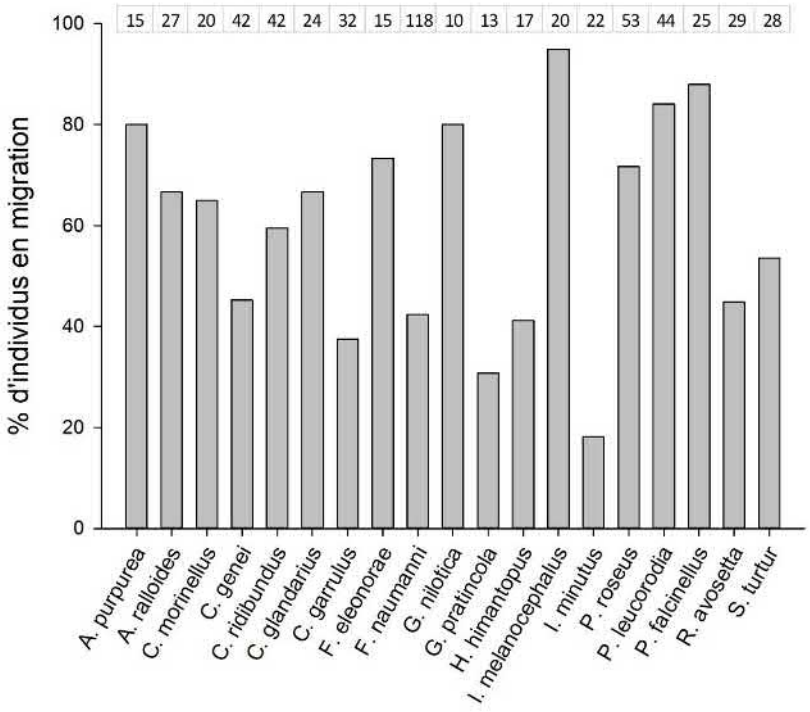


Figure 18 : Proportion d'individus ayant fourni des données de migration exploitables, pour chaque espèce. La taille d'échantillon est donnée en bandeau au-dessus.

Sur les 406 vols migratoires Nord-Sud, 198 (49%) se sont terminés en Europe (dont 153 en Espagne) et 84 (21%) en Afrique du nord (répartis à part égales en Tunisie, Algérie et Maroc) (Figure 19). Il faut toutefois noter que ces lieux de fin de suivi correspondent pour beaucoup à de petites espèces portant des balises de moins 10 g au lieu où elles n'ont plus transmis sur le réseau GSM après leurs traversées du Sahara. L'Afrique de l'Ouest était la destination de 94 (23%) oiseaux, en majorité au Mali et en Mauritanie (37 oiseaux dans chacun de ces pays), suivi du Sénégal et Gambie (10 et 6 individus) (Figure 20). L'Afrique australe était la destination de 21 (5%) des oiseaux (rolliers en Namibie et Botswana; et faucons d'Eléonore à Madagascar).

Les trajectoires de traversée du golfe du Lion sont représentées pour chaque espèce et groupe d'espèce dans la Figure 21.

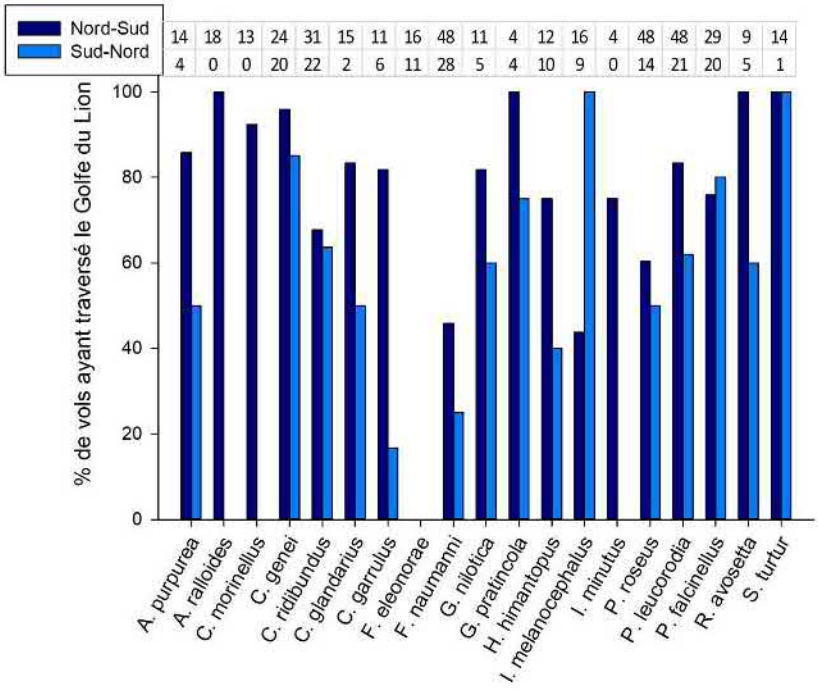
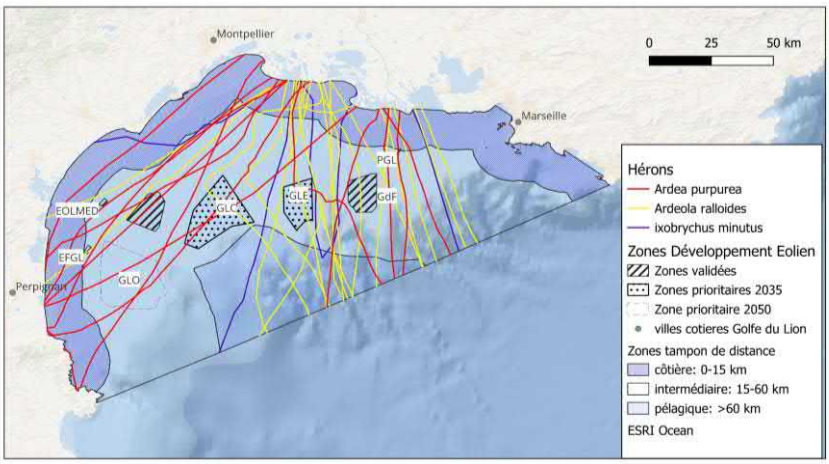


Figure 19 : Proportion d'individus ayant traversé le golfe du Lion, pour chaque espèce. Le code couleur indique la direction de traversée (Nord-Sud en bleu foncé, Sud-Nord en bleu clair). La taille d'échantillon est donnée en bandeau au-dessus.

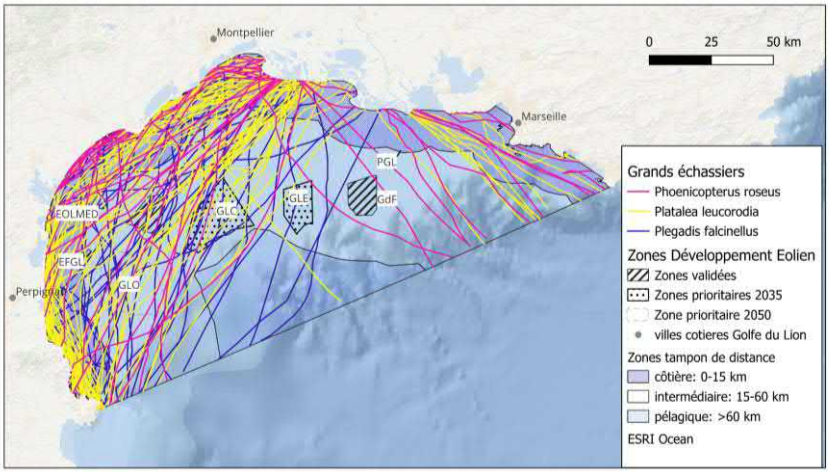


Figure 20 : Carte globale de l'ensemble des 406 trajets migratoires des 19 espèces d'oiseaux "terrestres" suivis par balise GPS entre 2021 et 2025.

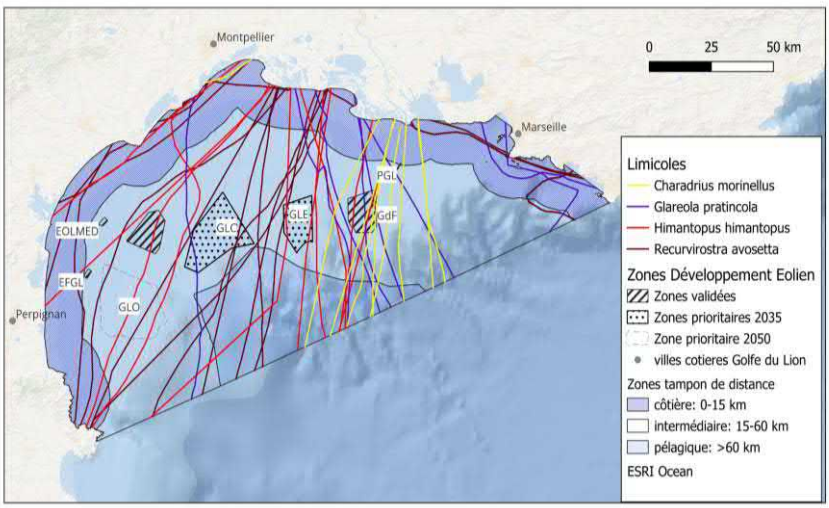
A.


Montpellier
Marseille
Perpignan
0 25 50 km
EOLMED
EFGL
GLO
GLC
GLE
PGL
GdF
Hérons
Ardea purpurea
Ardeola ralloides
ixobrychus minutus
Zones Développement Eolien
Zones validées
Zones prioritaires 2035
Zone prioritaire 2050
villes cotieres Golfe du Lion
Zones tampon de distance
côtière: 0-15 km
intermédiaire: 15-60 km
pélagique: >60 km
ESRI Ocean

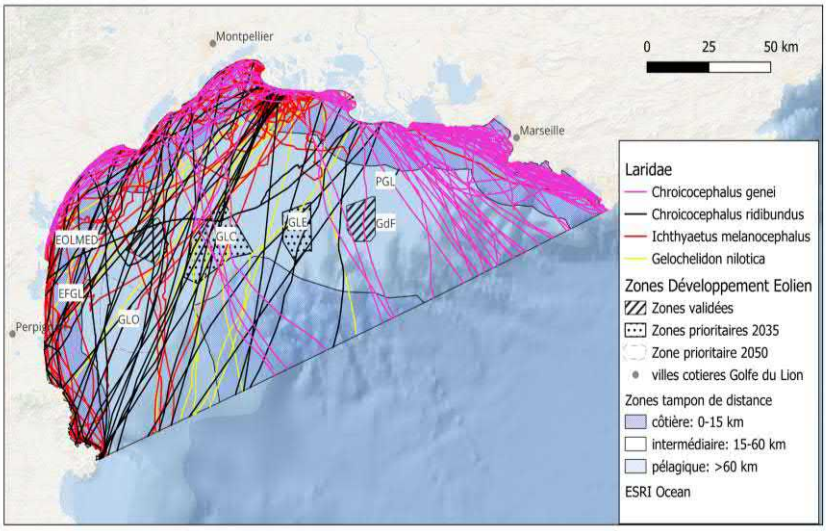
B.


Montpellier
Marseille
Perpignan
0 25 50 km
EOLMED
EFGL
GLO
GLC
GLE
PGL
GdF
Grands échassiers
Phoenicopterus roseus
Platalea leucorodia
Plegadis falcinellus
Zones Développement Eolien
Zones validées
Zones prioritaires 2035
Zone prioritaire 2050
villes cotieres Golfe du Lion
Zones tampon de distance
côtière: 0-15 km
intermédiaire: 15-60 km
pélagique: >60 km
ESRI Ocean

C.


Montpellier
Marseille
Perpignan
0 25 50 km
EOLMED
EFGL
GLO
GLC
GLE
PGL
GdF
Limicoles
Charadrius morinellus
Glareola pratincola
Himantopus himantopus
Recurvirostra avosetta
Zones Développement Eolien
Zones validées
Zones prioritaires 2035
Zone prioritaire 2050
villes cotieres Golfe du Lion
Zones tampon de distance
côtière: 0-15 km
intermédiaire: 15-60 km
pélagique: >60 km
ESRI Ocean

D.



E.

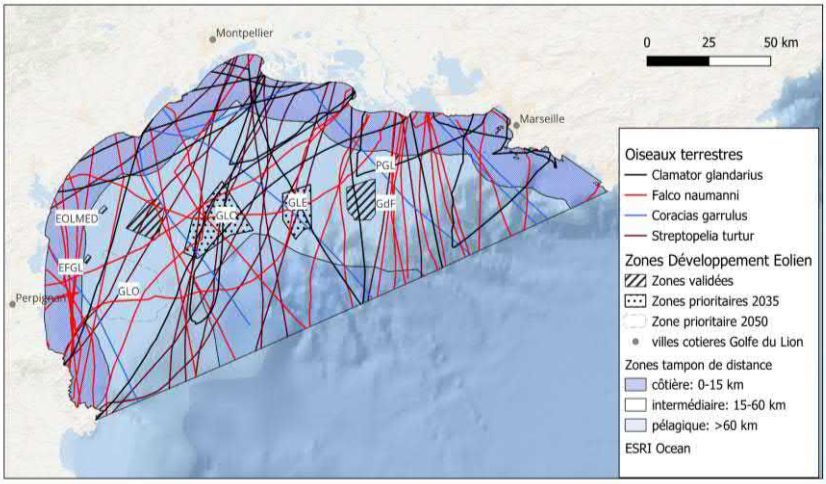


Figure 21 : Trajectoires de migration dans le golfe du Lion pour 5 groupes d'espèces: A. Hérons (héron pourpré, crabier chevelu, blongios nain), B. Grands échassiers (flamant rose, spatule blanche, ibis falcinelle), C. Limicoles (pluvier guignard, glaréole à collier, échasse blanche, avocette élégante), D. Laridae (goéland railleur, mouette rieuse, mouette mélanocéphale, sterne hansel), E: Oiseaux terrestres (coucou-geai, faucon crécerellette, rollier d'Europe, tourterelle des bois). Les directions de vol Nord-sud et Sud-Nord ne sont pas distinguées.

3.3.2 Phénologie de migration

Pour la migration Nord-Sud, les départs de France étaient répartis entre le 04/01 et le 17/12, mais ces valeurs extrêmes sont le fait d'espèces atypiques migrant sur d'autres sites en méditerranée à tout moment de l'année (goéland railleur, avocette élégante, ibis falcinelle et flamant rose). Sans ces 4 espèces, la date moyenne de départ en migration Nord-Sud était le 30/08 et s'étalait sur une durée moyenne de 79 jours. Ces dates de départ étaient très concentrées dans le temps pour les migrateurs à grande distance : 11 jours pour le faucon d'Eléonore, 18 jours pour le rollier et 15 jours pour la tourterelle des bois.

Concernant la migration Sud-Nord, les retours en France étaient répartis entre le 01/01 et le 31/12, à nouveau dû au fait des espèces migrant à courte distance en Méditerranée (goéland railleur,

avocette élégante, ibis falcinelle et flamant rose). La date moyenne de retour en France toutes espèces confondues était le 19/04. A nouveau les retours étaient davantage concentrés dans le temps pour les espèces migrant à grande distance (14 jours pour le rollier, 23 jours pour la glaréole, 32 jours pour la sterne hansel).

Les détails de phénologie de migration sont donnés pour chaque espèce dans les fiches espèces (**Annexe 2**).

3.3.3 Stratégies de survol du golfe du Lion par espèce

Parmi les 19 espèces suivies, toutes ont survolé le golfe du Lion dans la direction Nord-Sud, à l'exception du faucon d'Eléonore. En excluant cette dernière espèce, la proportion de survols était en moyenne de 74%, avec des variations entre 33% de survols pour le coucou-geai, et 100% de survols pour 4 espèces (crabier chevelu, glaréole à collier, avocette élégante et tourterelle des bois) (Figure 22). La moitié des individus (51%) a traversé le golfe en direction Sud ou Sud-Est. Cette stratégie "direct mer" concernait 78-100% des individus de 5 espèces (crabier chevelu, pluvier guignard, glaréole à collier, goéland railleur et rollier d'Europe). La stratégie de traversée du golfe en "diagonale" de la Camargue vers l'Espagne concernait 29% des vols, et était employée en majorité (>60%) par les mouettes rieuses, les sternes hansel et les ibis falcinelles. La stratégie "longe-côte" représentait 15% des vols, et était employée en majorité par les mouettes mélanocéphales. Enfin, dans 4% des vols, il était difficile de définir une stratégie de survol du golfe. Pour 8 espèces, les individus ont survolé le golfe de plusieurs manières : en majorité "direct mer" pour le héron pourpré, le faucon crécerellette, l'échasse blanche, le rollier d'Europe et la tourterelle des bois ; en "diagonale" pour l'avocette élégante et en "longe-côte" pour le flamant rose et la spatule blanche.

Pour la migration Sud-Nord, la proportion de survols du golfe du Lion concernait 56% des vols, avec des variations entre 17% pour le rollier d'Europe et 100% pour la mouette mélanocéphale (Figure 22) Aucun faucon d'Eléonore n'a survolé le golfe du Lion non plus en direction Sud-Nord. Il faut toutefois noter que nous n'avons recueilli aucune donnée de migration Sud-Nord pour 3 espèces (crabier chevelu, blongios nain et pluvier guignard), et pour seulement un individu de tourterelle des bois (qui a traversé le golfe). La stratégie principale de survol du golfe était la "diagonale" de l'Espagne vers la Camargue (53%), principalement pour 6 espèces (héron pourpré, coucou-geai, sterne hansel, ibis falcinelle, avocette élégante et tourterelle des bois. La seconde stratégie de survol (24%) était la stratégie "direct mer", principalement le rollier, la glaréole et le goéland railleur. Enfin 22% des survols ont suivi la stratégie "longe-côte", principalement les échasses blanches. Pour 5 espèces, les modalités de traversée étaient plus diversifiées : les spatules blanches, les mouettes rieuses et les mouettes mélanocéphales utilisaient principalement les stratégies "diagonale" et "longe-côte", alors que les faucons crécerellette et les flamants roses utilisaient les stratégies "direct-mer et diagonales".

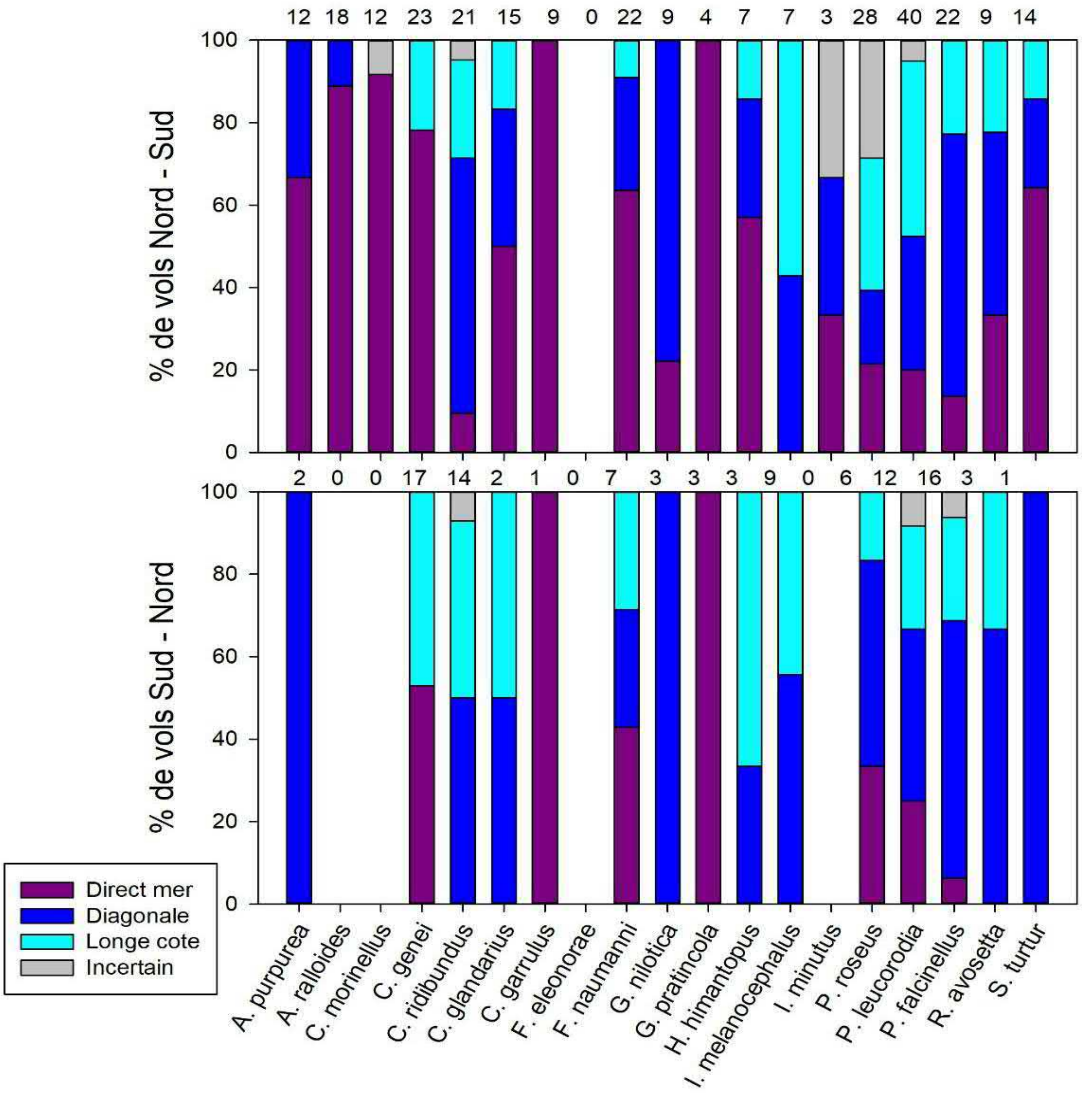


Figure 22 : Stratégies de traversée du golfe du Lion pour chaque espèce, dans la direction Nord-Sud (en haut) et dans la direction Sud-Nord (en bas). Les types de stratégies de migration font référence à la Figure 6 : Stratégies de vol migratoire au-dessus du golfe du Lion. La taille d'échantillon (nombre de vols total) est indiquée en bandeau au-dessus de chaque graphe.

3.3.4 Survol des zones de développement éolien

La fréquentation des ZDEs a été étudiée en mesurant pour chaque individu la distance parcourue dans le golfe du Lion, en séparant les zones côtières (0-15 km), intermédiaire (15-60 km, où se trouvent les ZDEs) et dans la zone pélagique (au-delà de 60 km) (Figure 23). D'une manière générale, c'est la zone côtière qui a été le plus utilisée, totalisant 49% et 59% de la distance parcourue respectivement en migration Nord-Sud et Sud-Nord, alors que la surface de cette zone côtière représentait 30% du golfe du Lion. La zone pélagique n'a été que très peu traversée (6% en Nord-Sud et 3% en Sud-Nord) alors qu'elle représente 13% de la surface du golfe du Lion. La zone intermédiaire a été utilisée entre 44% en Nord-Sud et 39% en Sud-Nord alors qu'elle représente 58% de la surface du golfe du Lion. On peut conclure à une utilisation préférentielle de la zone côtière et un franchissement plus rapide des zones intermédiaires et pélagiques. Les espèces passant plus de 50%

de leur temps de vol en migration Nord-Sud dans la zone intermédiaire sont les hérons, les limicoles, la mouette rieuse, la sterne hansel et les oiseaux terrestres (faucons, rolliers, coucou-geai et tourterelle des bois). En migration Sud-Nord, on retrouve la mouette rieuse, la sterne hansel, la glaréole à collier, l'échasse blanche, la tourterelle des bois, le flamant rose et l'ibis falcinelle.

Les ZDEs représentent 14% de la surface totale de la zone intermédiaire. Les oiseaux migrateurs y passent 11% de leur temps en migration Nord-Sud mais 20% en migration Sud-Nord. Il existe bien entendu de fortes disparités entre les espèces. **Les espèces passant plus de 20% de leur temps dans les ZDEs sont la mouette rieuse, le faucon crécerellette, la tourterelle des bois et les trois grands échassiers (flamant rose, ibis falcinelle, spatule blanche), mais uniquement en migration Sud-Nord. Il semble donc que dans les zones d'implantation des parcs éoliens en mer, le risque sera plus fort pour ces espèces en migration Sud-Nord.**

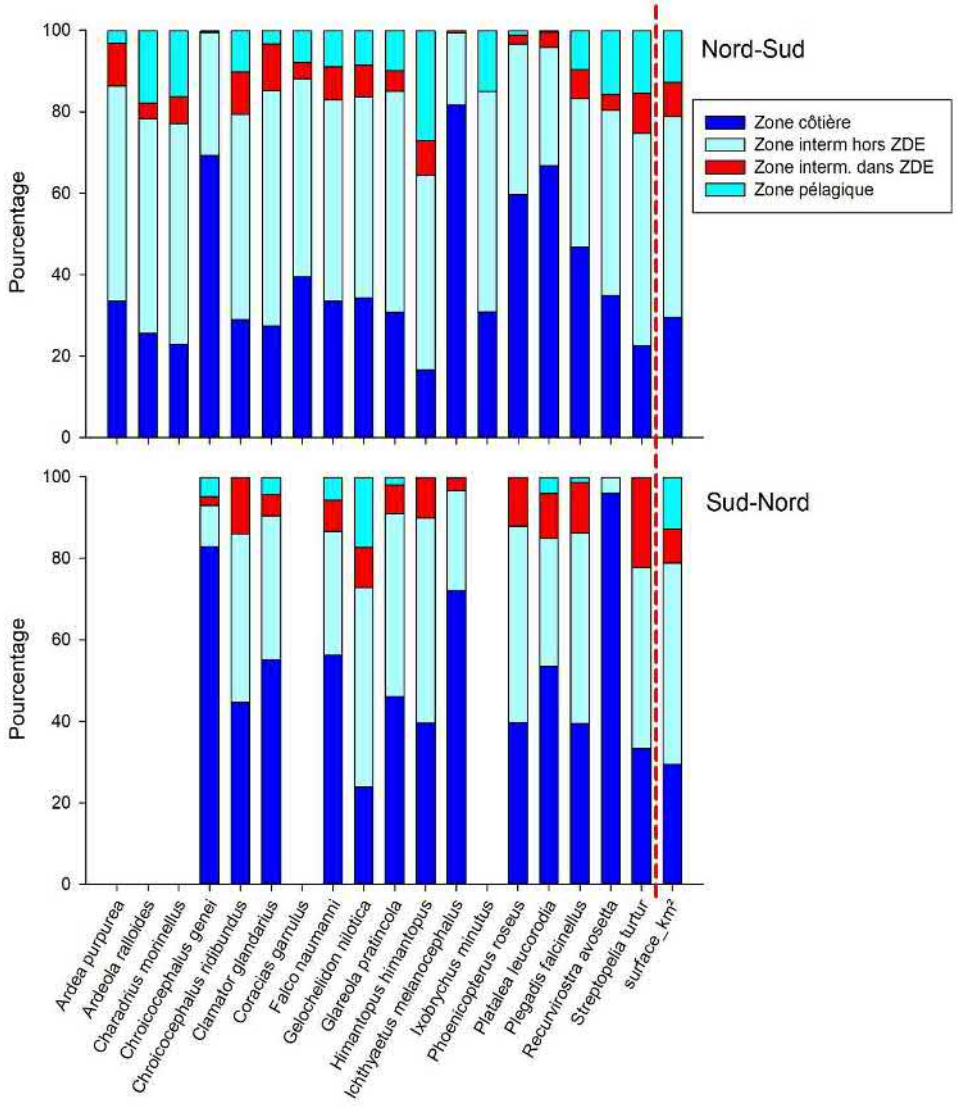


Figure 23 : Proportion de distance parcourue (en km) pour chaque espèce par zone du golfe du Lion (Zone côtière de 0 à 15 km, Zone intermédiaire de 15 à 60 km, Zone pélagique au-delà de 60 km). Les zones de développement éolien (ZDE) se situent dans la Zone intermédiaire. A droite de la ligne en pointillé rouge est indiquée la proportion de surface que chaque zone occupe dans le golfe du Lion. Les graphes du haut et du bas représentent respectivement les migrations Nord-Sud et Sud-Nord (Il manque de données pour 4 espèces pour la migration Sud-Nord).

En étudiant en détail la fréquentation des ZDEs (Figure 24), relativement à leur surface dans la zone intermédiaire, les zones GDF et GLC étaient les plus fréquentées suivies par GLE, lors de la migration Nord-Sud. Les espèces concernées étaient les limicoles (pluvier guignard, glaréole à collier et échasse blanche) pour GdF; coucou-geai, tourterelle des bois et sterne hansel pour GLC, et rollier d'Europe et échasse blanche pour GLE. En migration Sud-Nord, les zones les plus utilisées étaient GLO, GLC, et secondairement NAR et GLE. À l'exception de la mouette mélanocéphale et de l'avocette, toutes les espèces utilisaient une ou deux de ces zones.

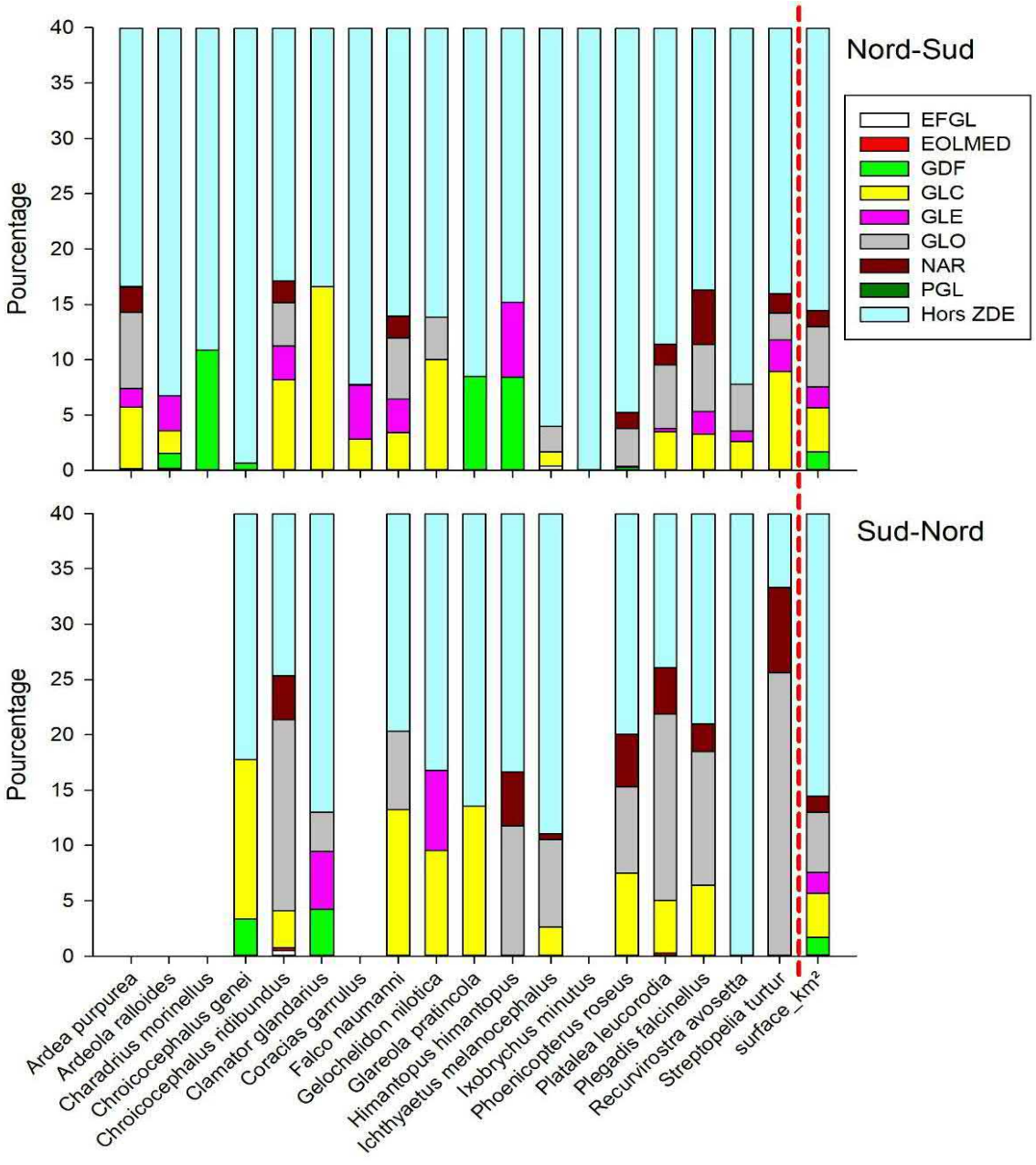


Figure 24: Proportion de distance parcourue (en km) pour chaque espèce dans la zone intermédiaire (de 15 à 60 km) du golfe du Lion, détaillant les 8 zones de développement éolien (ZDE) et la zone hors ZDE. A droite de la ligne en pointillé rouge est indiquée la proportion de surface que chaque zone occupe dans la zone intermédiaire du golfe du Lion. Les graphes du haut et du bas représentent respectivement les migrations Nord-Sud et Sud-Nord (Il manque de données pour 4 espèces pour la migration Sud-Nord).

Les hauteurs de survol (Figure 25) ne sont que brièvement étudiées ici car les données ont été intégrées à la modélisation finale du lot 6. On remarque de fortes différences entre espèces et entre les directions de migration. Globalement les oiseaux avaient tendance à voler à plus haute altitude lors des vols Nord-Sud (automne) que lors des vols Sud-Nord (printemps). Certaines espèces montraient des comportements de vol très différents entre les deux directions de vol : c'était particulièrement vrai pour la sterne hansel et la glaréole à collier (entre 500 et 1000 m en Nord-Sud et autour de 2000 m en Sud-Nord pour la sterne mais au ras de l'eau pour la glaréole). En direction Nord-Sud, dans les ZDEs, seule la mouette mélanocéphale a volé en moyenne sous 20 m et 10 espèces ont volé entre 20 et 300 m, issues de toutes les familles. En migration Sud-Nord, 5 espèces ont volé sous 20 m en moyenne (mouette rieuse, glaréole à collier, échasse blanche, flamant rose, tourterelle des bois) et 4 ont volé entre 20 et 300 m de hauteur (goéland railleur, mouette mélanocéphale, spatule blanche et ibis falcinelle). Nous pouvons conclure que **quelle que soit la direction de migration, la majorité des espèces étudiées vole en moyenne dans la tranche 0-300 m lors des traversées des ZDE, soit dans la zone d'altitude des pales d'éoliennes en mer, avec une proportion plus importante en migration Sud-Nord (9 espèces sur 14) qu'en migration Nord-Sud (11 espèces sur 18).**

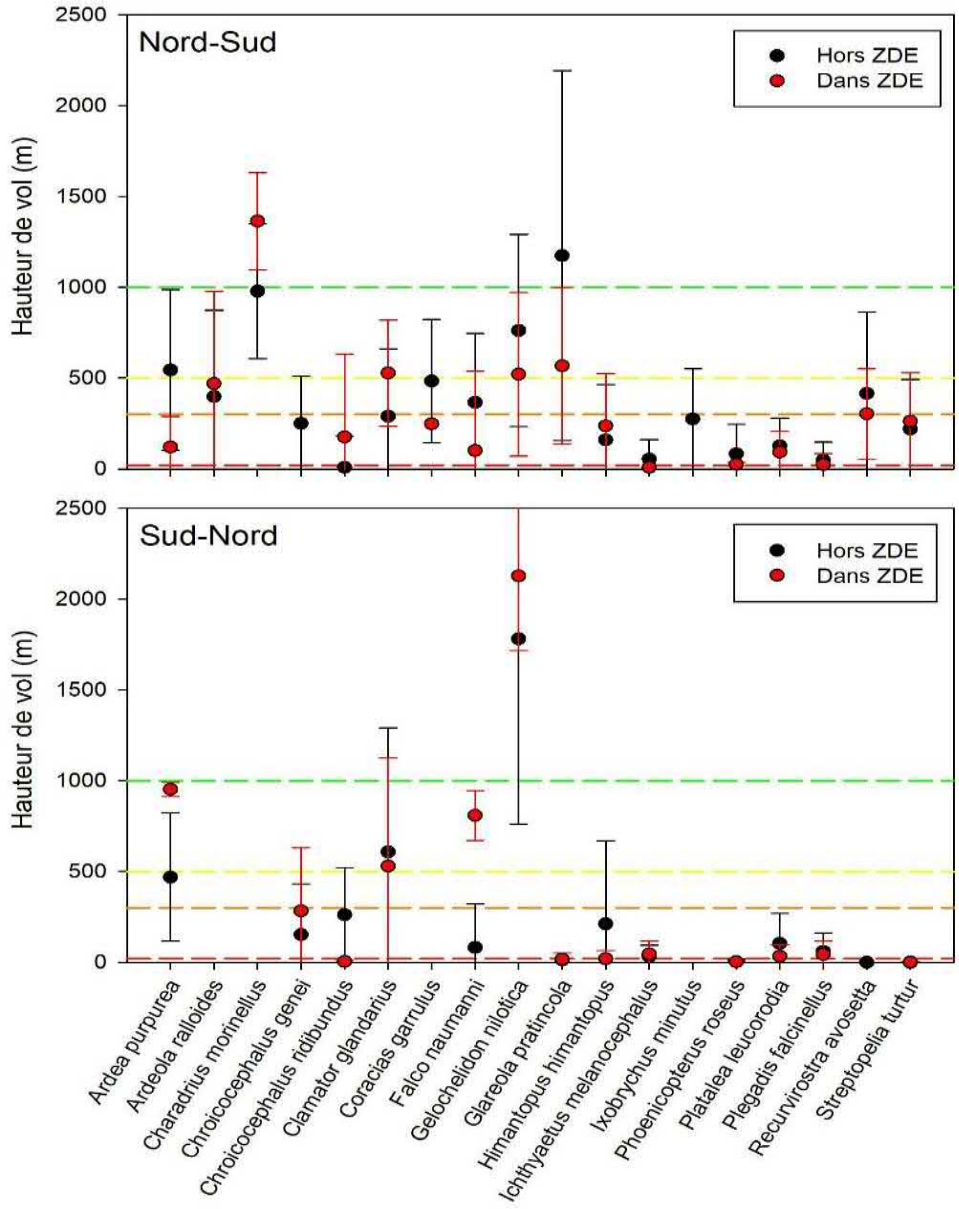


Figure 25 : Hauteur de vol pour chaque espèce, dans la zone intermédiaire (15-60 km de la côte) pour les directions de migration Nord-Sud (en haut) et Sud-Nord (en bas). Les moyennes et écart-types sont comparés à l'intérieur des ZDE (en rouge) et en dehors (en noir). Les lignes horizontales colorées donnent les repères des classes d'altitude (20 m en rouge, 300 m en orange, 500 m en jaune, 1000m en vert).

3.3.5 Facteurs influençant les stratégies de survol du golfe du Lion

Pour franchir la barrière marine que constitue la mer Méditerranée, les oiseaux ont deux options : a) suivre la côte, ce qui leur permet de s'arrêter si nécessaire (par exemple en cas de conditions météorologiques défavorables) ou b) effectuer une traversée directe, en ligne droite. En plus de contraintes écologiques propres à chaque espèce, le choix entre ces deux « options » est fortement influencé par les conditions environnementales rencontrées au cours de leur voyage migratoire (Senner et al., 2018, Shamoun-Baranes et al., 2017). Sjöberg et al. (2015) ont montré que la décision de départ était affectée par les conditions de vent des jours précédents chez les passereaux migrant à

travers la mer Baltique. La décision de départ peut être ajustée de manière flexible, notamment en utilisant l'augmentation de la pression atmosphérique comme indice (Cooper et al., 2023). Une telle augmentation de la pression est généralement liée à des températures chaudes, à un ciel dégagé (c'est-à-dire indiquant l'utilisation de repères célestes pour l'orientation) et à des vents calmes au cours des jours précédents, servant collectivement d'indicateur pour un début de vol en toute sécurité. Inversement, lorsque les conditions ne sont pas optimales, les migrants peuvent généralement reporter leur départ.

Les conditions de départ et les stratégies de vol pour traverser le golfe du Lion en migration postnuptiale ont été étudiées en utilisant des données télémétriques de 121 vols migratoires issues de 15 espèces de gros oiseaux équipés de GPS (**Figure 3.26**).

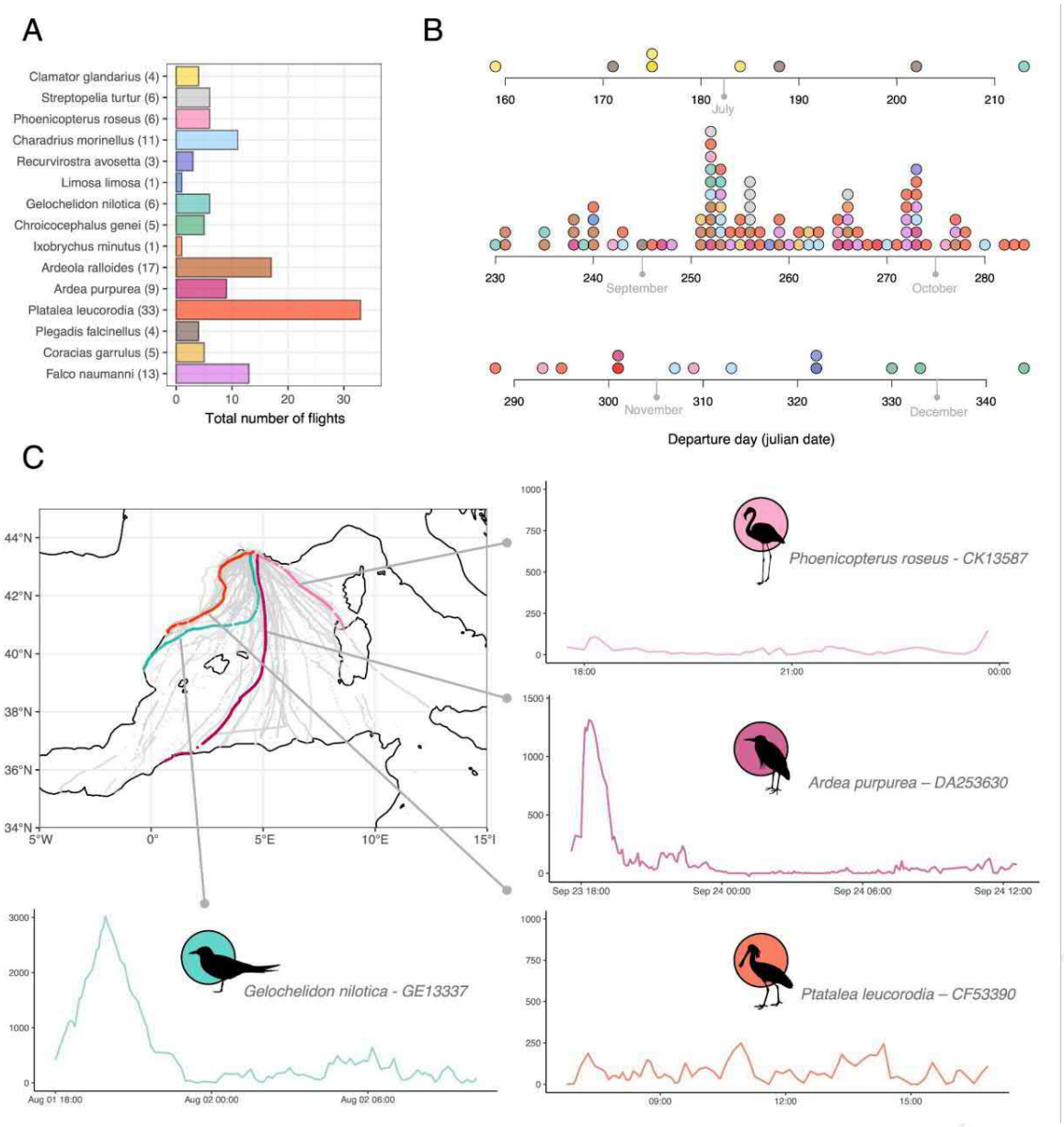


Figure 26 : Description des données utilisées dans la présente étude. A. Répartition entre espèces (n = 15) des vols migratoires partant de la partie terrestre du golfe du Lion et traversant la Méditerranée (n = 121). B. Phénologie de la migration post-nuptiale pour tous les individus inclus dans l'étude. La date de départ est donnée en date calendaire, à partir du premier jour de janvier. C. Exemples de

trajectoires de vol d'oiseaux de différentes espèces lors de la traversée de la Méditerranée, et profils d'altitude associés. Les profils d'altitude représentent la variation de l'altitude de vol (en mètres au-dessus du niveau de la mer) pendant toute la durée de la traversée. Silhouettes reproduites à partir de PhyloPic (http://phylopic.org/) sous une licence Creative Commons.

Cinq stratégies de vol ont été identifiées à partir de l'ensemble des vols migratoires en mer par une classification des vols migratoires (Figure 27). Les stratégies correspondent à des vols partageant les mêmes caractéristiques. 8 variables descriptives ont été retenues pour décrire les vols: la direction entre le premier et le dernier point du vol (degrés ; avec 0° = 360° = Nord), la durée du vol (heures), l'altitude médiane (mètres), l'altitude maximale du vol (mètres), le temps pour atteindre l'altitude maximale (heures), la vitesse d'ascension pendant le premier quart du vol (mètres/minutes), le temps passé dans la zone altitudinale de 200-500 m et dans la zone altitudinale de 500-1000 m (minutes).

La stratégie n°1 (n = 45 vols) regroupait les individus volant le long de la côte de la péninsule ibérique à basse altitude (< 500 m). La probabilité de choisir cette stratégie augmentait lorsque le vent souffle de l'Est 6 heures avant le départ; la stratégie n°2 (n = 19 vols) impliquait de voler à haute altitude (associée à une vitesse ascensionnelle élevée au début du vol), au-dessus de la Méditerranée occidentale ou de traverser en direction du sud au-dessus des îles Baléares sans s'arrêter ; la stratégie n°3 (n = 8 vols) concernait des vols traversant directement la mer avec des vols longs d'une durée médiane proche de 20 heures et un large éventail de directions, pour atteindre l'Afrique du Nord ou la Sicile. La probabilité d'utiliser cette stratégie était liée à la diminution de la température 24 heures avant le départ; la stratégie n°4 (n = 23 vols) comprenait des vols au-dessus de la Méditerranée occidentale, avec une durée médiane de 15 heures, les individus passant la plupart du temps dans la couche altitudinale de 200 à 500 mètres ; et la stratégie n°5 (n = 26 vols) était principalement caractérisée par des vols orientés vers le Sud-Est, atteignant la Sardaigne ou l'Afrique du Nord (par ex. la Tunisie). La probabilité d'utiliser cette stratégie augmentait avec la vitesse moyenne du vent 6 heures avant le départ. La répartition des individus pour chaque espèce était présentée en détail en **Annexe 4**.

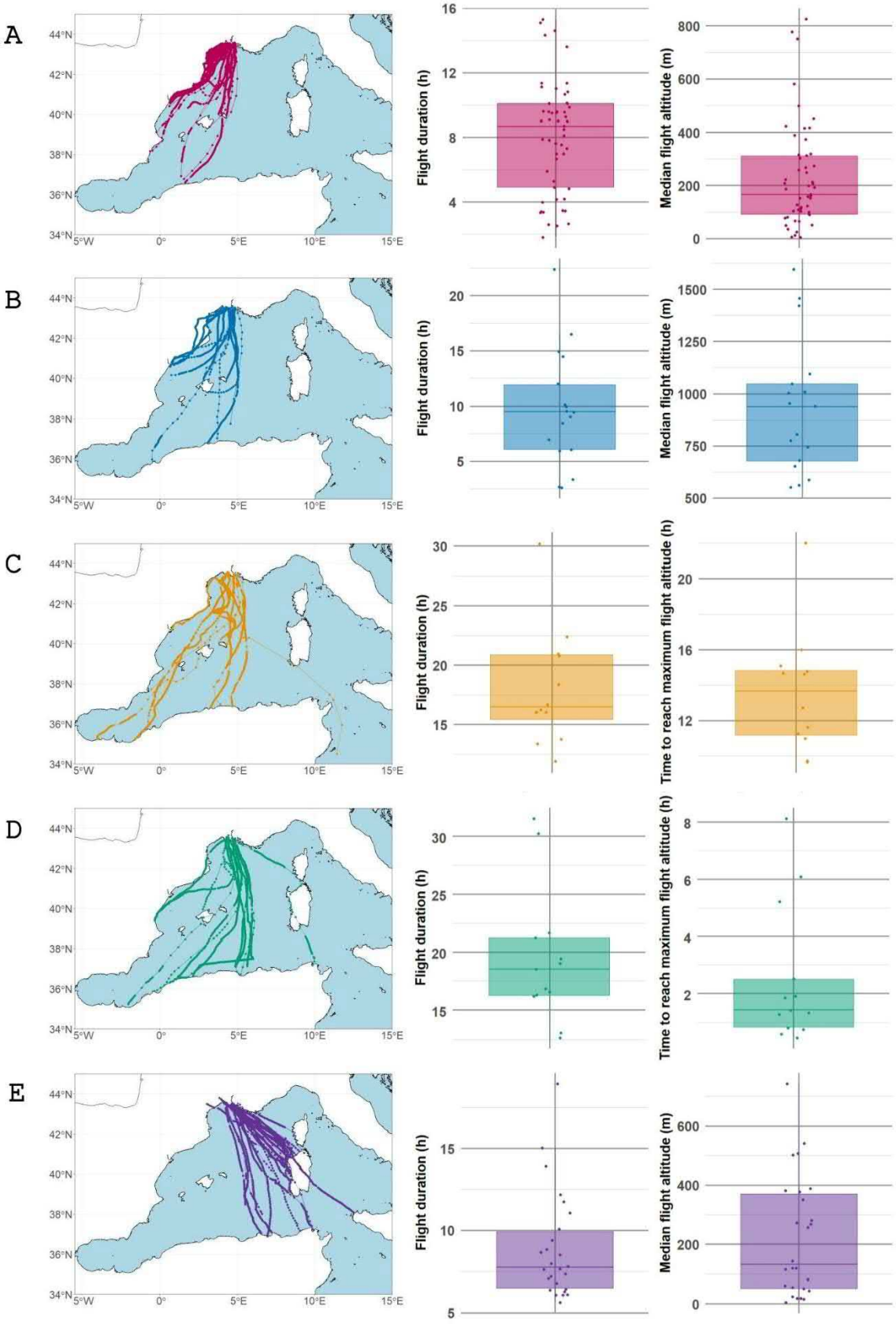


Figure 27 : Caractérisation des stratégies de vol pour traverser la Méditerranée à partir de 121 vols migratoires postnuptiaux. Le panneau de gauche présente les trajectoires des vols appartenant à chaque stratégie. Le panneau de droite contient des diagrammes en boîte des valeurs des 8 variables

descriptives pour chaque stratégie. A. Stratégie 1 (n = 45 vols) ; B. Stratégie 2 (n = 19) ; C. Stratégie 3 (n = 8) ; D. Stratégie 4 (n = 23) et E. Stratégie 5 (n = 26).

Cette étude montre que les caractéristiques de vol au-dessus du golfe du Lion sont diverses et ne dépendent pas seulement de l'écologie ou de la morphologie de l'espèce mais également et dans une large mesure des conditions environnementales au moment du départ. Ces résultats se limitent aux vols migratoires post-nuptiaux, de la France vers le sud. L'analyse des caractéristiques des vols migratoires du sud vers le nord reste à faire mais sera plus difficile car moins de données ont été collectées et surtout les points de départ sont éparpillés sur un linéaire de côté de plusieurs milliers de kilomètres, entre le Maroc et la Tunisie.

3.4 Résultats Oiseaux terrestres (GLS)

Sur les 315 appareils déployés sur 19 espèces différentes de petits oiseaux migrateurs, nous avons récupéré 66 GLS exploitables issus de 17 espèces soit un total de 21%. Considérant les quelques oiseaux vus dont le GPS a été perdu ou n'a pu être récupéré, le taux de retour des oiseaux équipés de GLS était de 24%. Pour comparaison, le taux de retour des individus témoin était de 70 individus sur 349 bagues posées soit 20%, soit un taux qu'on peut considérer comme similaire. Parmi tous les vols et trajectoires analysées, nous avons pu identifier 28 vols correspondant à des traversées marines de la mer Méditerranée, mais uniquement chez 8 de ces espèces (Tableau 3). Cette répartition suggère que certaines espèces sont potentiellement plus enclines que d'autres à migrer au-dessus de la mer. C'est par exemple le cas du traquet motteux (3 individus ayant traversé la mer sur 3 GLS récupérés) ou encore du pipit rousseline (4 individus ayant traversé la mer sur 5 GLS récupérés) ou de la bergeronnette printanière (4 individus ayant traversé la mer sur 5 GLS récupérés). Cependant, étant donné le faible nombre de GLS récupérés pour certaines espèces (ex. 1 seul GLS récupéré pour le monticole de roche qui a vraisemblablement effectué un vol en mer lors de sa migration automnale), il reste difficile de tirer des conclusions générales sur la probabilité ou la fréquence de migration au-dessus de la mer selon l'espèce.

Tableau 3: *Détail par espèce des nombres de traversées marines disponibles.*

Espèce	n GLS exploitables	% GLS récupérés	n traversées marines nord-sud	n traversées marines sud-nord
Petit-duc scops	4	57	1	1
Engoulevent d'Europe	2	18	0	1
Guêpier d'Europe	4	11	0	0
Huppe fasciée	4	19	4	1
Pie-grièche à tête rousse	3	14	0	0
Rousserolle turdoïde	2	8	0	0
Fauvette orphée	6	24	0	0
Gobemouche gris	5	50	0	0
Rougequeue à front blanc	4	20	0	0
Rossignol philomèle	3	14	1	0
Monticole de roche	1	33	1	0
Traquet motteux	3	20	3	2
Tarier des prés	7	30	0	0
Hirondelle rustique	5	31	0	0
Hirondelle rousseline	0	0	0	0
Hirondelle de fenêtre	2	20	0	0
Bergeronnette printanière	6	30	4	1
Pipit rousseline	5	24	4	4
Pipit des arbres	0	0	0	0

3.4.1 Durée et stratégie des traversées

Les vols identifiés présentaient des durées très variables (minimum de 7 heures 30 minutes pour un pipit rousseline, maximum de 30 heures pour une bergeronnette printanière, moyenne de 12 heures 15 minutes pour l'ensemble des vols, (voir Figure 28**)** et reflète principalement la diversité des distances à parcourir. Les vols correspondant à des traversées complètes depuis le sud de la France jusqu'aux côtes nord-africaines sont, comme attendu, plus longs que ceux se limitant à un tronçon plus court, par exemple entre la Catalogne et les îles Baléares. Les espèces qui ont effectué de nombreuses traversées comme le pipit rousseline, la bergeronnette printanière ou le traquet motteux sont également celles qui effectuent ces vols les plus longs (voir Figure 28). Chez le pipit rousseline,

plusieurs oiseaux sont partis depuis leur site de reproduction du sud de la France pour rejoindre en un seul vol, de fait majoritairement au-dessus de l'eau, les côtes nord-africaines avant de continuer leur migration plus au sud. De la même façon, plusieurs traquets motteux sont vraisemblablement descendus en quelques petits vols depuis le Vercors (où ils ont été équipés) jusqu'à la côte Méditerranéenne avant de rejoindre les côtes nord-africaines en un seul vol au-dessus de la mer (voir le profil sur la Figure 28). Pour les espèces qui ont effectué des vols plus courts (ex. huppe fasciée, petit-duc Scops, rossignol philomèle), il est possible que ces oiseaux aient commencé à migrer le long de la côte espagnole avant d'entreprendre une traversée en direction des côtes nord-africaines. De la même façon, on peut supposer que de nombreux individus de plusieurs autres espèces (ex. gobemouche gris, rougequeue à front blanc, hirondelle rustique) ont pu traverser la mer depuis le sud de la péninsule ibérique (sud de Valence en Espagne) mais l'imprécision de géo-positionnement de la méthode GLS ne nous permet pas de le vérifier. Dans l'ensemble, il est probable que les conditions météorologiques, notamment le vent, aient influencé la durée de ces vols, bien que cela n'ait pas pu être vérifié directement dans cette étude avec cette technologie.

En termes de stratégie temporelle, la majorité des traversées ont eu lieu de nuit, ce qui est conforme aux comportements connus chez les petits migrateurs terrestres (Newton 2008). Néanmoins, certains individus ont prolongé leur vol durant la journée. On dénombre en effet 16 vols sur 29 (55%) qui se sont prolongés au-delà de la première nuit (Figure 28). Il s'agit surtout des espèces comme la bergeronnette printanière ou le traquet motteux qui, comme indiqué précédemment, sont les espèces qui ont effectué les traversées au-dessus de l'eau les plus longues notamment depuis les côtes méditerranéennes françaises.

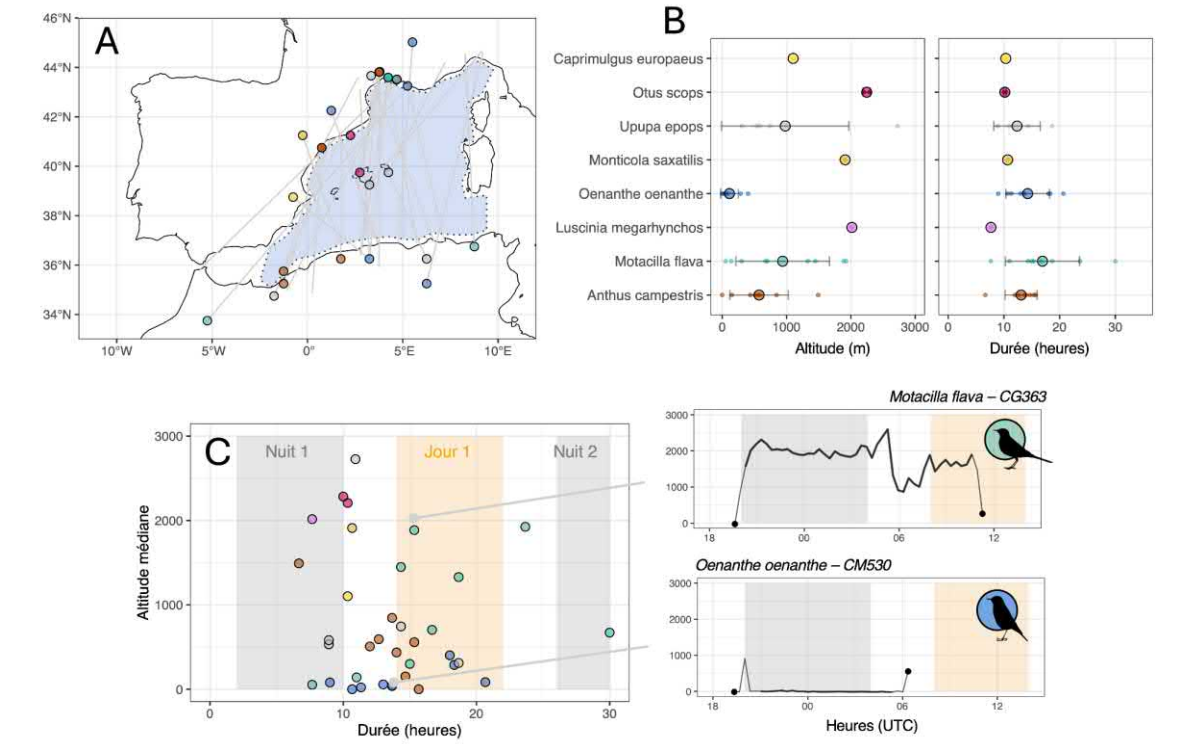


Figure 28 : Localisations et variations de la durée et de l'altitude des vols chez de petites espèces migratrices lors de la traversée d'une barrière marine (ici différentes parties de la mer Méditerranée). En A, chaque vol est représenté par une ligne grise, avec un point coloré indiquant la zone stationnaire précédente ; les couleurs correspondent aux espèces (voir code couleur en B). Nous avons pris en compte à la fois les vols directs depuis le sud de la France ou le nord de la péninsule Ibérique vers le continent africain, ainsi que ceux comprenant une escale dans les îles Baléares. En B, les valeurs moyennes par espèce des altitudes médianes et des durées de vol sont présentées. En C, les durées de vol (en heures) sont représentées en fonction des altitudes médianes (en mètres au-dessus du niveau de la mer). Chaque point correspond à un vol, coloré selon l'espèce. Les barres jaunes et grises indiquent respectivement les périodes diurnes (8h00–16h00 UTC) et nocturnes (20h00–4h00 UTC). Sur les deux profils d'altitude, les lignes épaissies indiquent la partie du vol effectuée au-dessus de la mer.

3.4.2 Altitudes de vol

Concernant l'altitude de vol, nous avons observé que 10 des 28 traversées (soit 36 %) se sont déroulées à une altitude médiane inférieure à 500 mètres au-dessus du niveau de la mer. Plus précisément, les traquets motteux ont effectué leurs vols à une altitude moyenne de 112 ± 137 m (n = 5 vols), tandis que les pipits rousseline volaient en moyenne à 572 ± 455 m (n = 8 vols). Ces altitudes sont particulièrement basses comparées à celles généralement observées chez les petits migrateurs lorsqu'ils survolent la terre (ex. Adamik et al. 2024, Liechti et al. 2018) ou d'autres types de barrières écologiques telles que les déserts (Sjöberg et al. 2021, Dufour et al. 2024). Le détail des vols Fig 3.30 confirme que plusieurs espèces de petits oiseaux migrateurs volent à la surface de l'eau pendant une partie de leur traversée.

De plus, chez les quelques individus (4 espèces sur les 8 ayant effectué au moins un vol au-dessus de l'eau, 50%) ayant prolongé leur vol au-delà de la nuit, une tendance claire à une baisse d'altitude en journée a été mise en évidence (voir Figure 29). Les oiseaux ayant parcouru la première partie de leur vol migratoire de nuit et à une certaine altitude descendent ensuite vers des altitudes plus basses, plus proches du niveau de la mer, pour achever leur migration, atteignant soit les côtes nord-africaines en automne, soit les côtes européennes au printemps. Ce comportement pourrait refléter une adaptation pour éviter la surchauffe ou tirer parti de conditions aérodynamiques spécifiques proches de la surface de la mer (Norevik et al. 2023). Les profils d'altitude de tous les vols identifiés comme ayant eu lieu au-dessus de la mer sont visibles en Figure 30.

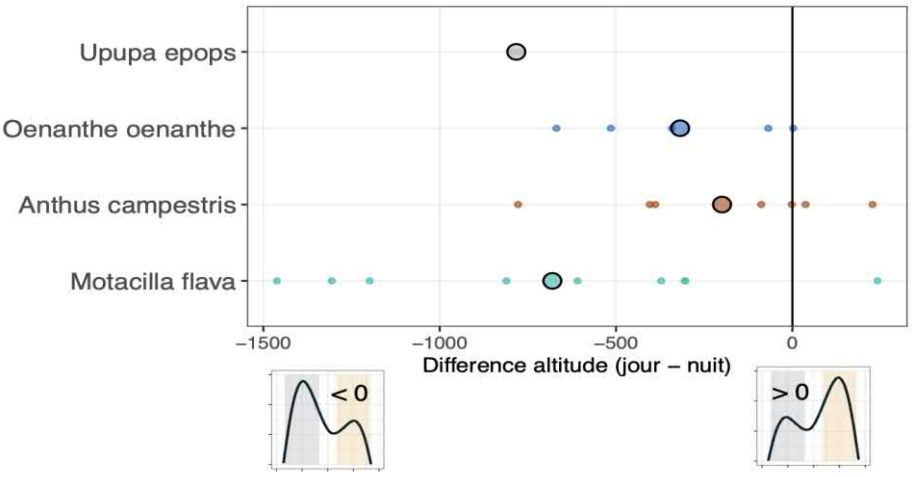
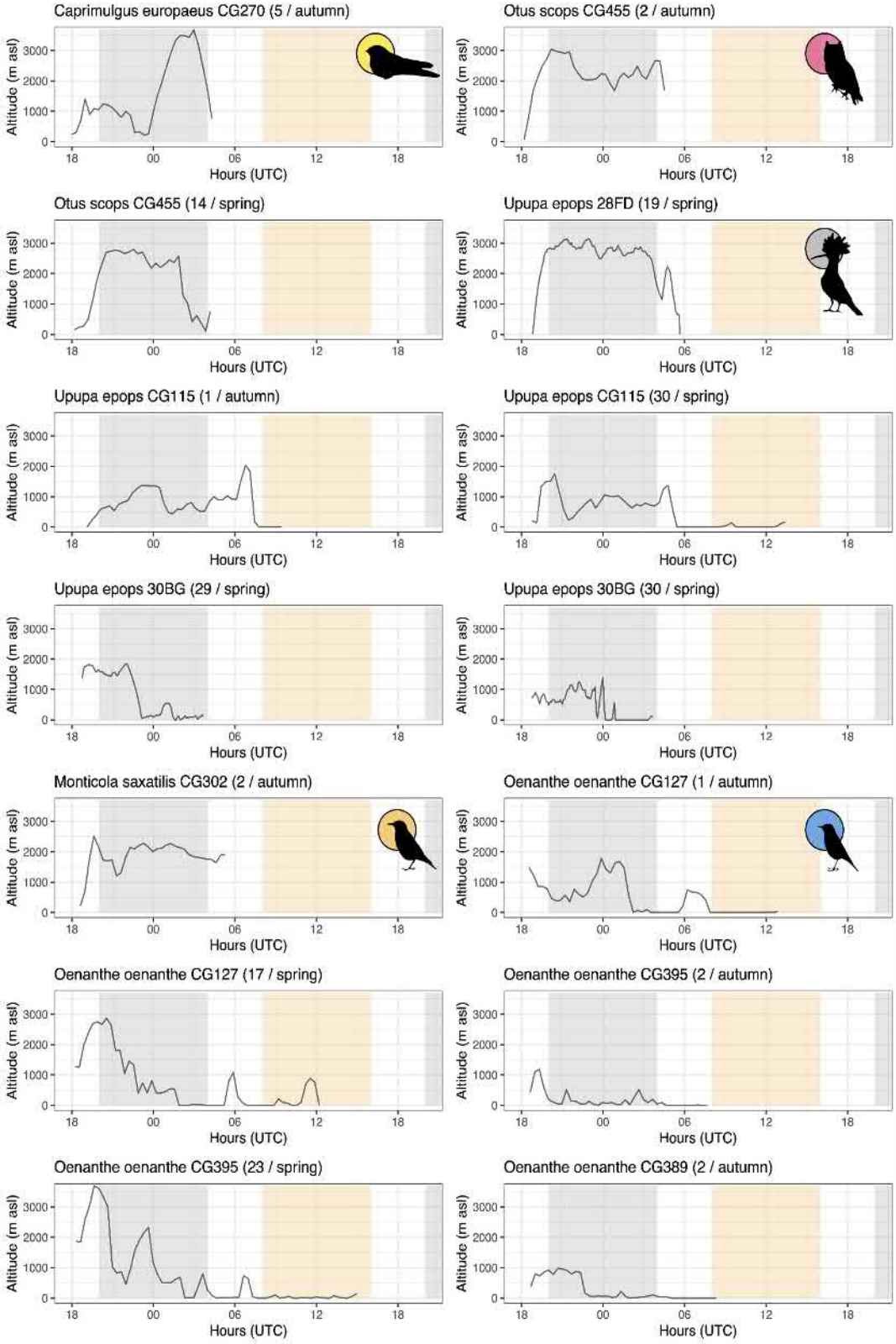


Figure 29 : Différences d'altitude de vol entre le jour et la nuit chez de petites espèces migratrices lors de la traversée de barrières marines. Cette figure concerne uniquement les vols qui durent plus d'une nuit. L'axe des abscisses indique la différence d'altitude (jour moins nuit), les valeurs positives représentant des altitudes de vol plus élevées pendant la journée, et les valeurs négatives des altitudes plus élevées la nuit. Les points les plus gros représentent les valeurs moyennes.



Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

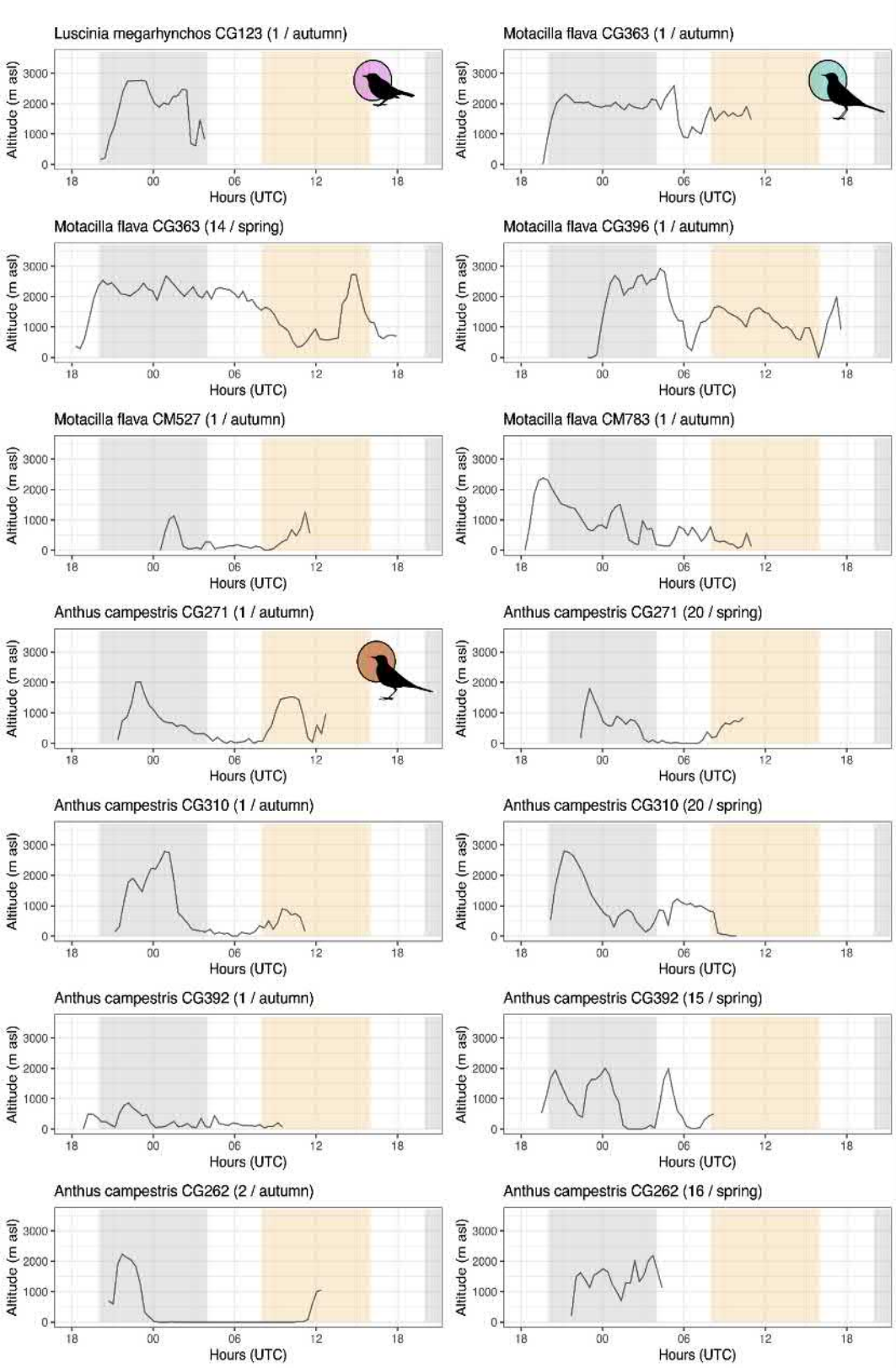


Figure 30 : Profil d'altitude des 28 vols de traversées marines identifiés chez les petits oiseaux migrateurs équipés de GLS. Les barres jaunes et grises indiquent respectivement les périodes diurnes (8h00–16h00 UTC) et nocturnes (20h00–4h00 UTC).

3.4.3 Perspectives et implications

Malgré un nombre limité d'échantillons ces résultats sont uniques, en ce qu'ils offrent l'un des premiers aperçus détaillés des traversées maritimes chez de petits oiseaux migrateurs. À ce jour, la seule autre étude comparable est celle de Norevik et al. (2023), qui a montré chez l'engoulevent d'Europe que les vols diurnes au-dessus de la mer se déroulaient également à très basse altitude. La méthode utilisée ne permettait pas d'identifier les éventuels trajets qui n'auraient concerné que la traversée du golfe du Lion en diagonale puis en longeant la côte espagnole avant ou après mais les informations obtenues ne correspondent qu'à des traversées d'une surface de la mer Méditerranée plus importante que le golfe du Lion. De nombreux éléments restent encore à découvrir concernant les facteurs influençant les stratégies de traversée de ces petits oiseaux migrateurs, notamment en ce qui concerne la répartition des flux ou les variations d'altitude entre la nuit et le jour. Une meilleure précision dans la localisation des individus permettrait sans doute de mieux comprendre comment les conditions environnementales — telles que le vent, l'humidité ou la température de l'air — peuvent moduler ces comportements. Par ailleurs, l'utilisation de nouveaux capteurs, capables par exemple de mesurer la température interne de l'oiseau durant ces longs vols, pourrait également révéler si les changements d'altitude visent à rechercher des zones d'altitude plus fraîches, en altitude ou à proximité de l'eau, afin d'éviter la surchauffe.

D'un point de vue méthodologique, ce programme a pu servir à mettre en pratique la méthode de géo-positionnement par la pression récemment développée (Nussbaumer et al. 2023a, b). De nouvelles fonctionnalités ont pu être développées pour le package R *GeoPressureR* suite à l'analyse de ce jeu de données (https://raphaelnussbaumer.com/GeoPressureManual/).

D'un point de vue écologique, les données acquises ont permis d'identifier les zones d'hivernage de ces oiseaux et des informations inédites sur les modes de migration, en particulier sur les traversées du désert, en plus des traversées de la mer (Dufour et al. 2024, Jiguet et al. 2025).

Concernant les risques de collision avec les éoliennes en mer Méditerranée, le fait qu'une proportion importante des vols longs en Méditerranée s'effectue à moins de 500 mètres place ces oiseaux à hauteur des pales des futures éoliennes. Ce risque est particulièrement préoccupant au printemps, lorsque les oiseaux remontent vers le Nord. Si la traversée ne peut être accomplie en une seule nuit, les individus se retrouvent potentiellement alors à plus basse altitude en journée, prolongeant leur vol dans une zone où le risque de collision est probablement plus élevé.

4. Bilan du lot 3 et perspectives

Des données inédites ont été obtenues dans le cadre du lot télémétrie de MIGRALION. Des espèces d'oiseaux d'une large gamme de taille ont été équipées depuis les rougequeues à front blanc de 12 g aux flamants roses de plus de 4 kg, afin d'obtenir des connaissances sur le franchissement de la mer Méditerranée d'une partie la plus représentative possible des oiseaux migrateurs et des oiseaux marins (cf. 3.2 ; 3.3 ; 3.4). Les données obtenues ont été analysées de façon plus approfondie dans le cadre du Lot 6 (Canonne et al. 2025), en complétant par des jeux de données de télémétrie additionnelles issues d'autres espèces, et en intégrant des jeux de données d'observations lors de campagnes en mer (Lot 4) ainsi que de radars à la côte (Lot 5).

Même si le jeu de données qui concerne 40 espèces reste modeste au regard d'une estimation de 300 espèces d'oiseaux migrateurs dans la région, un certain nombre d'espèces n'avaient jamais été équipées et des informations inédites ont été obtenues sur le passage en mer de celles-ci. On peut citer à titre exemple la glaréole à collier, le crabier chevelu, le pluvier guignard ou la bergeronnette printanière.

Dans le contexte du développement des parcs éoliens en mer Méditerranée, il serait pertinent d'augmenter le nombre d'espèces équipées afin d'être plus représentatif de la guilde des oiseaux migrateurs. Cependant, nos résultats montrent que les grands oiseaux comme les petits oiseaux migrateurs volent fréquemment dans l'emprise des pales des parcs éoliens prévues en mer Méditerranée. Les données spatialisées de hauteur de vol des oiseaux de grande taille, qu'ils soient migrateurs ou marins, suggèrent un effet négatif des parcs éoliens en mer, avec des interactions directes (collision) et indirectes (évitement) probables avec les projets en cours de développement. Des données spatialisées de hauteur de vol des oiseaux ayant une masse inférieure à 75g s'avèrent cruciales pour identifier les zones d'interactions de ces petits oiseaux avec les parcs éoliens en mer à venir.

Il serait particulièrement intéressant de refaire des campagnes de capture et d'équipement sur les mêmes espèces une fois le premier parc éolien implanté pour comprendre si les oiseaux changent de comportement face à ces éléments nouveaux du paysage. A titre d'exemple, une étude en Suède a montré que les groupes de rapaces en migration entre la Suède et le Danemark avaient changé de voie migratoire après la construction des parcs éoliens en mer, les oiseaux se dirigeant alors davantage vers le secteur des éoliennes qu'avant leur construction (Skov et al. 2016). La migration des oiseaux est un phénomène dynamique et les espèces peuvent rapidement changer de comportement au regard de nouveaux obstacles, de disparitions ou d'indisponibilité de sites de haltes ou de nouvelles conditions environnementales, invalidant potentiellement dans le futur certaines conclusions énoncées ici.

Les perspectives de ce travail pourraient consister d'une part à quantifier le taux de mortalité induit par ces nouveaux obstacles pour les populations d'oiseaux migrateurs, d'autre part d'en étudier les conséquences démographiques pour les populations (voir le rapport du lot 6, Canonne et al. 2025, pour plus de détails sur ces perspectives).

5. Références bibliographiques

Adamík, P., Wong, J.B., Hahn, S. et al. (2024) Non-breeding sites, loop migration and flight activity patterns over the annual cycle in the Lesser Grey Shrike Lanius minor from a north-western edge of its range. J Ornithol 165, 247–256.

Adams, J., Kelsey, E.C., Felis, J.J., Pereksta, D.M. (2017) Collision and displacement vulnerability among marine birds of the California Current System associated with offshore wind energy infrastructure (ver. 1.1, July 2017): U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1154, 116 p., https://doi.org/10.3133/ofr20161154.

Benhamou, S. (2011) Dynamic approach to space and habitat use based on biased random bridges. PLoS One 6, e14592.

Calenge, C. (2006) The package "adehabitat" for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals. Ecological Modelling, 197, 516–519.

Canonne, C., Queroué, M., Roques, S., Lauret, V., Schroll, L., Cat, V., Courbon, N., Planque, Y., Champagnon, J., Duriez, O., Besnard, A. 2025. MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : Rapport final du Lot 6 « Développement de méthodes permettant l'analyse des différentes données produites dans le cadre du programme et issues d'autres projets ». Rapport pour l'OFB. 156 PP. MIGRALION : lot 6 | Eoliennes en mer.

Clay, T. A., Joo, R., Weimerskirch, H., Phillips, R. A. et al. (2020) Sex-specific effects of wind on the flight decisions of a sexually dimorphic soaring bird. Journal of Animal Ecology, 89, 1811−1823.

Courbin, N., Besnard, A., Péron, C., Saraux, C., Fort, J., Perret, S., Tornos, J., Grémillet, D. (2018). Short-term prey field lability constrains individual specialisation in resource selection and foraging site fidelity in a marine predator. Ecology Letters, 21, 1043-1054.

Courbin, N., Besnard, A., Grémillet, D. (2024) Transnational mortality from Spanish longline fisheries bycatch is shaping the decline of a vulnerable French seabird. Biological Conservation, 293, 110597.

Cooper, N. W., Dossman, B. C., Berrigan, L. E., Brown, J. M., Cormier, D. A., Bégin Marchand, C., ... & Marra, P. P. (2023). Atmospheric pressure predicts probability of departure for migratory songbirds. Movement Ecology, 11(1), 23.

De Grissac, S., Jiguet, F. (2023) MIGRATLANE - Caractérisation de l'utilisation de l'arc Atlantique Nord-Est par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : synthèse bibliographique. Lot 2 – Télémétrie sur les migrateurs terrestres et oiseaux marins. Rapport pour l'OFB. France.

de Valpine, P., Turek, D., Paciorek, C. J., Anderson-Bergman, C., Lang, D. T., Bodik, R. (2017) Programming With Models: Writing Statistical Algorithms for General Model Structures With NIMBLE. Journal of Computational and Graphical Statistics, 26, 403–413.

de Valpine, P., Paganin, S., Turek, D. (2022) compareMCMCs: An R package for studying MCMC efficiency. Journal of Open Source Software, 7, 3844.

Deakin, Z., Cook, A., Daunt, F., McCluskie, A., Morley, N., Witcutt, E., Wright, L., Bolton, M. (2022) A review to inform the assessment of the risk of collision and displacement in petrels and shearwaters from offshore wind developments in Scotland. Scientific report, Scottish Government, December 2022, 140 pp.

Désert, T., Jouet, A., Delcourt, V. (2023) MIGRATLANE - Caractérisation de l'utilisation de l'arc Atlantique Nord-Est par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : synthèse bibliographique. Lot 4 – Radars ornithologiques et météorologiques. Rapport pour l'OFB. France.

Dierschke, V., Furness, R.W., Garthe, S. (2016) Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. Biological Conservation, 202, 59-68.

Dufour, P., Nussbaumer, R., Bocher, P., Briedis, M., Coulomb, Y., Delacroix, R., Dagonet, T., De Franceschi, C., De Grissac, S., Jeannin, B., Monchatre, R., Rey, F., Tillo, S., Champagnon, J., Duriez, O., Jiguet, F. (2024). Variations in flight strategy of small migratory birds crossing major ecological barriers. https://doi.org/10.1101/2024.08.18.608464

Fijn, R. C., Collier, M. C. (2022) Distribution and flight heights of Sandwich Terns *Thalasseus sandvicensis* during different behaviours near wind farms in the Netherlands. Bird Study, 69, 53-58.

Furness, Robert W., Wade, Helen M. ,Masden, Elizabeth A. 2013. Assessing Vulnerability of Marine Bird Populations to Offshore Wind Farms. Journal of Environmental Management 119: 56–66.

Gauld, Jethro G., João P. Silva, Philip W. Atkinson, et al. 2022. Hotspots in the Grid: Avian Sensitivity and Vulnerability to Collision Risk from Energy Infrastructure Interactions in Europe and North Africa. *Journal of Applied Ecology* 59 (6): 1496-512. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14160.

Jiguet, F., Champagnon, J., Duriez, O., de Franceschi, C., Tillo, S., Dufour, P. (2025). Crossing the Sahara by small jumps : The complete migration of the Western Orphean Warbler Curruca hortensis. Journal of Ornithology. https://doi.org/10.1007/s10336-025-02258-4

Johnston, A., Cook, A. S. C. P., Wright, L. J., Humphreys, E. M., Burton, N. H. K. (2014) Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. Journal of Applied Ecology, 51, 31-41.

Lane, J.V., Spracklen, D.V., & Hamer, K.C. (2019) Effects of windscape on three-dimensional foraging behaviour in a wide-ranging marine predator, the northern gannet. Marine Ecology Progress Series, 628, 183–193.

Langrock, R., King, R., Matthiopoulos, J., Thomas, L., Fortin, D., Morales. J. M. (2012) Flexible and practical modeling of animal telemetry data: hidden Markov models and extensions. Ecology, 93, 2336-42.

Lauret, V., Gimenez, O., Besnard, A. (2022) MIGRALION - Caractérisation de l'utilisation du golfe du lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires : rapport méthodologique (lot 6, analyse combinée des données). Rapport pour l'OFB (Livrable 32).

Liechti F, Bauer S, Dhanjal-Adams KL, Emmenegger T, Zehtindjiev P, Hahn S. (2018) Miniaturized multi-sensor loggers provide new insight into year-round flight behaviour of small trans-Sahara avian migrants. Mov Ecol 6, 19. (doi:10.1186/s40462-018-0137-1)

McClintock, B. T., Michelot, T. (2018) momentuHMM: R package for generalized hidden Markov models of animal movement. Methods in Ecology and Evolution, 9, 1518-1530.

Miller, M. G. R., Petrovic, S., Clarke, R.H. (2025) A global review of Procellariiform flight height, flight speed and nocturnal activity: Implications for offshore wind farm collision risk. Journal of Applied Ecology, 62, 1795-1819.

Millon, Alexandre, Aurélien Besnard, Olivier Duriez, et al. 2025. VULNEO: Évaluation de La Sensibilité et de La Vulnérabilité de l'Avifaune Aux Infrastructures Éoliennes Terrestres En France Métropolitaine. IMBE Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale ; OFB, Office Français de la Biodiversité. https://hal.science/hal-05093997, accessed August 26, 2025.

Morales, J. M., D. T. Haydon, J. L. Frair, K. E. Holsinger, Fryxell, J. M. (2004) Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. Ecology, 85, 2436-2445.

Newton I (2008) The migration ecology of birds. Academic, London

Norevik G, Åkesson S, Hedenström A. (2023) Extremely low daylight sea-crossing flights of a nocturnal migrant. PNAS Nexus 2, pgad225.

Nussbaumer, R., Gravey, M., Briedis, M., Liechti, F. (2023). Global positioning with animal-borne pressure sensors. Methods in Ecology and Evolution, 14, 1104–1117. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14043

Nussbaumer, R., Gravey, M., Briedis, M., Liechti, F., Sheldon, D. (2023). Reconstructing bird trajectories from pressure and wind data using a highly optimized hidden Markov model. Methods in Ecology and Evolution, 14, 1118–1129. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14082

Rime, Y., Nussbaumer, R., Briedis, M., Sander, M. M., Chamberlain, D., Amrhein, V., Helm, B., Liechti, F., Meier, C. M. (2023). Multi-sensor geolocators unveil global and local movements in an Alpine-breeding long-distance migrant. Movement Ecology, 11(1), 19. https://doi.org/10.1186/s40462-023-00381-6

Rhyne, G. S., Stouffer, P. C., Briedis, M., Nussbaumer, R. (2024). Barometric geolocators can reveal unprecedented details about the migratory ecology of small birds. Ornithology, 141(3), ukae010. https://doi.org/10.1093/ornithology/ukae010

Ross-Smith, V. H., Thaxter, C. B., Masden, E. A., Shamoun-Baranes, J., Burton, N. H. K., Wright, L. J., Rehfisch, M. M., Johnston, A. (2016) Modelling flight heights of lesser black-backed gulls and great skuas from GPS: a Bayesian approach. Journal of Applied Ecology, 53, 1676-1685.

Senner, N. R., Stager, M., Verhoeven, M. A., Cheviron, Z. A., Piersma, T., Bouten, W. (2018). High-altitude shorebird migration in the absence of topographical barriers: avoiding high air temperatures and searching for profitable winds. Proceedings of the Royal Society B, 285(1881), 20180569.

Shamoun-Baranes, J., Liechti, F., Vansteelant, W. M. (2017). Atmospheric conditions create freeways, detours and tailbacks for migrating birds. Journal of Comparative Physiology A, 203, 509-529.

Sjöberg S. et al. (2021) Extreme altitudes during diurnal flights in a nocturnal songbird migrant. Science 372, 646–648. (doi:10.1126/science.abe7291)

Skov, H., Desholm, M., Heinänen, S., Kahlert, J. A., Laubek, B., Jensen, N. E., Žydelis, R., Jensen, B. P. (2016). Patterns of migrating soaring migrants indicate attraction to marine wind farms. Biology Letters, 12(12), 20160804. https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0804

Thaxter, C. B., Green, R. M. W., Collier, M. P., Taylor, R. C., Middelveld, R. P., Scragg, E. S., Wright, L. J., Cook, A. S. C. P., Fijn, R. C. (2024) Behavioural responses of Sandwich terns following the construction of offshore wind farms. Marine Biology, 171, 58.

6. Remerciements du lot 3

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont permis la bonne réalisation du programme. De telles acquisitions de données n'auraient pas été possible sans l'investissement des bagueurs et bagueuses, de leurs assistant.e.s et des bénévoles qui les ont accompagnés. En particulier nous tenons à remercier **Christophe de Franceschi** (CEFE/CNRS), **Robin Monchatre** (TdV), **Fanny Rey** (TdV), **Bastien Jeannin** (TdV), **Thomas Dagonet** (TdV/SMCG), **Virginie Gailly** (TdV), **Théo Chateaugiron** (TdV), **Marie Fretin** (TdV), **Thomas Blanchon** (TdV), **Antoine Arnaud** (TdV), **Carole Leray** (TdV), **Yves Kayser** (TdV), **Eliott Huguet** (COGARD), **Rémi Tiné** (SMCG), **Olivier Scher** (CEN occitanie), **Sophie de Grissac** (FEM/MNHN), **Betty Plaquin** (OFB), **Charlotte Francesiaz** (OFB), **Christophe Pin** (Amis des marais du Vigueirat), **Philippe Pilard** (LPO), **Timothée Schwartz** (A. Rocha), **Thibault Lacombe** (Monticola), **Naïs Avargues** (PN Calanques), **Jeremy Tornos** (CEFE/CNRS), **Samuel Perret** (CEFE/CNRS) et le personnel du CRBPO.

Les structures qui nous ont accueilli ont été indispensables pour obtenir de nombreuses captures. En particulier, nous tenons à remercier vivement les partenaires et gestionnaires des sites dont les logos apparaissent ci-dessous

Nous remercions les étudiants du Master Gestion de l'Environnement et de la Biodiversité qui ont aidé à l'analyse finale des migrations des oiseaux par balise GPS : **Lucie Foucart, Manon Cossard, Imane Romangin, Vincent Candela,** et **Capucine Benoit-Grignard**.

Merci à **Raphaël Nussbaumer** de la station ornithologique suisse pour la collaboration et les échanges fréquents pour l'analyse des données, ainsi qu'à **Martins Briedis, Felix Liechti et Steffen Hahn** de la station ornithologique suisse pour la collaboration et la mise à disposition de GLS multicapteurs. Nous remercions **Aurélien Besnard** pour les données sur les mouettes rieuses.

Enfin, nous tenons à remercier les membres du consortium MIGRALION pour les échanges tout au long du programme et des personnes en charge du suivi du programme à l'OFB.












A ROCHA
FRANCE


SALINS


GROUPE ORNITHOLOGIQUE du ROUSSILLON


pays de l'or
AGGLOMÉRATION


LPO


MONT
ICOLA
EXPERTISE NATURALISTE


Conservatoire
d'espaces naturels
Occitanie


Conservatoire
du littoral


Réserve Naturelle
COUSSOULS DE CRAU


Conservatoire
d'espaces naturels
Provence-Alpes-Côte d'Azur


Parc national
de Port-Cros


Parc national
des Calanques

7. Valorisation des résultats du lot 3

Le lot 3 « Télémétrie migrateurs terrestres et oiseaux marins » du programme MIGRALION a permis la réalisation de nombreux travaux de recherche, qui sont ici synthétisés selon leur nature. L'ensemble des données acquises au sein du programme permettront de poursuivre les travaux d'études et de recherche scientifique au cours des prochaines années.

L'ensemble des rapports MIGRALION sont rendus publics sur https://www.eoliennesenmer.fr/ et l'ensemble des jeux de données (brutes et prétraitées) produits ont été remis à l'OFB, et sont publics.

Livrables réalisés par le lot 3 au cours du programme

Livrable L15 : Premier rapport d'analyses des données acquises (Année 1)

Livrable L17 : Second rapport d'analyses des données acquises (Années 1 & 2)

Conférences scientifiques internationales

Champagnon, J, Dufour, P., Tillo, S., Jiguet, F. & Duriez, O. 2025. Flight altitudes of migrating birds crossing future offshore wind energy facilities in the Mediterranean Sea [Poster]. 8th Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, Montpellier

Denoual, L., Champagnon, J., Duriez, O., Jiguet, F., Tillo, S. & Dufour, P. 2025. Influence of weather conditions on the flight decisions of migratory birds over future offshore wind energy facilities [Oral]. 8th Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, Montpellier

Planque, Y., Dufour, P., Tillo, S., Besnard, A., Champagnon, J., Jiguet, F. & Duriez, O. 2025. MIGRALION: a large research programme that provides key knowledge about avifauna migration and presence at sea in the Gulf of Lion (Mediterranean Sea, France) in the context of offshore wind energy development [Poster]. 8th Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, Montpellier

Kalaitzakis, I. et al. (2025, 22/08). GPS-tracking reveals strong individual heterogeneity in migratory movements of Mediterranean Gulls throughout Europe [Oral Presentation]. European Ornithological Union, Bangor, Wales. https://www.bangor.ac.uk/eou-congress

McKinlay, S. E. et al. (2025, 22/08). Global patterns of migratory connectivity in barn swallows [Oral Presentation]. European Ornithological Union, Bangor, Wales. https://www.bangor.ac.uk/eou-congress

Ramellini, S., Assandri, G., Bermejo-Bermejo, A., Bustamente, J., Cagnacci, F., Calvario, E., Catoni, C., Champagnon, J., Daminai, M. L., de la Puente, J., de Pascalis, F., Duriez, O., Evangelidis, A., Garcés-Toledano, F., Hachem, F., Jiguet, F., Lopez-Ricaurte, L., Morganti, M., Morinay, J., … Rubolini, D. (2023, août). Strategies for crossing an ecological barrier: The Mediterranean Sea as a case study [Oral]. 14th European Ornithologists' Union Congress, Lund, Sweden. https://www.eou2023.event.lu.se/

Houndenou D, Scher O, Champagnon J, Tillo S, Monchatre R, Dagonet T, Jiguet F, Duriez O. 2025, September 28. Telemetry reveals the migration secrets of three Mediterranean waders [poster]. International Waders Study Group annual conference, Groningen, Netherlands.

Scher, O., Duriez, O., Tillo, S., Champagnon, Jocelyn, J., Dufour, P., Rey, F., Monchatre, R., Dagonet, T., & Jiguet, F. (2024, 23/09). GPS telemetry reveal migration patterns of two Mediterranean waders [Poster]. International Waders Study Group annual conference, Montpellier.

Dufour, P., Duriez, O., Champagnon, J., Tillo, S., & Jiguet, F. (2023, août). Strategies for crossing an ecological barrier : The Mediterranean Sea as a case study [Poster]. 14th European Ornithologists' Union Congress, Lund, Sweden. https://www.eou2023.event.lu.se/

Conférences scientifiques nationales, interventions diverses

Champagnon, J. (2025). Migralion - Caractérisation de l'utilisation du golfe du Lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine à l'aide de méthodes complémentaires. COPIL N200 Camargue, Saintes Maries de la Mer.

Lopez Ricaurte, L., Champagnon, J., Hodic, S., Marin Prado, P., Van Steelant, W., & Vera, P. (2025). Changements ontogénétiques dans la mobilité des flamants roses longévifs au cours des saisons de reproduction et de non-reproduction [Présentation orale]. Journée d'échanges sur la migration des oiseaux, Tour du Valat, Arles.

Champagnon, J. de Grissac, S. (2021). Présentation orale du programme MIGRALION. Séminaire, Tour du Valat, Arles. 6 décembre 2021

Champagnon, J. (2024). Présentation du programme MIGRALION. CSRPN Occitanie et PACA. Tour du Valat, Arles, France. 28 septembre 2024

Champagnon, J. (2022). Migralion project. Laboratoire de José Alves, Université d'Aveiro, Alcochete, Portugal. 19 Septembre 2022.

Conférences grand public

Champagnon et al. EOS Débat Eoliennes flottanteS. Visioconference. 16 septembre 2021

Duriez et al. EOS Débat Eoliennes flottanteS. Visioconference. 27 octobre 2021

Articles scientifiques

Courbin, N., Bernard, A., Besnard, A., Perret, S., Tornos, J., Lambrechts, A., Scher, O., Gaskin, C. P., Cabelguen, J., Bécot, M., Provost, P., Boulinier, T., Grémillet, D. (*en préparation*). Ocean waves and winds shape complex seabird flight responses: Key insights for wind farm developments.

Denoual, L., Duriez, O., Champagnon, J., Jiguet, F., Tillo, S., Dufour, P., (*en préparation*). Influence of weather conditions on the crossing of a large ecological barrier by migratory birds.

Dufour, P., Nussbaumer, R., Bocher, P., Briedis, M., Coulomb, Y., Delacroix, R., Dagonet, T., De Franceschi, C., De Grissac, S., Jeannin, B., Monchatre, R., Rey, F., Tillo, S., Champagnon, J., Duriez, O., & Jiguet, F. (2024). Variations in flight strategy of small migratory birds crossing major ecological barriers. https://doi.org/10.1101/2024.08.18.608464

Ferreira, H. R. S., Alves, J. A., Jiguet, F., Duriez, O., Blanchon, T., Lok, T., & Champagnon, J. (2024). Role of protected areas for a colonial-breeding waterbird in a fragmented landscape throughout its annual cycle. Landscape Ecology, 40(1), 6. https://doi.org/10.1007/s10980-024-02017-5

Jiguet, F., Champagnon, J., Duriez, O., de Franceschi, C., Tillo, S., & Dufour, P. (2025). Crossing the Sahara by small jumps : The complete migration of the Western Orphean Warbler *Curruca hortensis*. Journal of Ornithology. https://doi.org/10.1007/s10336-025-02258-4

Mémoires étudiants (rapports de stage)

Denoual Léo. 2024. Influence des conditions météorologiques sur la traversée d'une barrière écologique par les oiseaux migrateurs, le cas de la Mer Méditerranée. Master 2 DynaMO : Dynamique et Modélisation de la Biodiversité, Université Grenoble-Alpes.

8. Remerciements généraux

L'Office français de la biodiversité tient à adresser ses plus vifs remerciements à l'ensemble des prestataires, chercheurs, partenaires institutionnels et acteurs de terrain qui ont contribué à la réussite de ce programme. Nous exprimons notre profonde gratitude à la Direction de l'eau et de la biodiversité, à la Direction générale de l'énergie et du climat, ainsi qu'aux Régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie pour leur soutien déterminant. Au-delà de l'appui financier et institutionnel, c'est l'ampleur des efforts déployés, l'engagement constant et la rigueur de toutes les personnes mobilisées qui ont permis d'aboutir à des résultats collectifs solides et porteurs pour la connaissance et la protection de la biodiversité.

9. Annexes

• Annexe 1 : Modélisation des hauteurs de vol des oiseaux marins

Les données de hauteur de vol estimées par GPS étant peu précises dans notre cas, nous avons utilisé un modèle espace-état dans un cadre Bayésien pour corriger le biais de mesure d'altitude par GPS (Ross-Smith et al. 2016). Nous avons utilisé uniquement les données identifiées par les HMMs comme n'étant pas au repos, et avec une vitesse au sol > 1.1 $m.s^{-1}$. Nous avons exclu les 1% inférieurs et supérieurs de la distribution d'altitude pour réduire le biais d'estimation de la variance d'erreur d'observation. Le modèle espace-état considère chaque mesure d'altitude par GPS comme une observation avec une erreur, et dépend de la vraie distribution des altitudes de vol (processus biologique) et de la distribution des observations (processus d'erreur). Nous avons considéré qu' une distribution Gaussienne des erreurs d'observation en partie expliquée par la valeur du HDOP (horizontal dilution of precision, Ross-Smith et al. 2016). Les mesures avec un faible HDOP ont une meilleure précision. Nous avons considéré que la distribution des vraies altitudes de vol suivait une loi Log-Normale (Johnston et al., 2014; Ross-Smith et al., 2016). Nous avons testé un effet de la vitesse du vent (variable continue), de la direction relative du vent (variable catégorique: vent de face, vent de côté et vent de dos [la référence]), et de la hauteur des vagues (variable continue) sur la hauteur de vol des oiseaux. Le modèle espace-état de hauteur de vol des oiseaux était:

- processus d'observation:

$alt_{obs,n} \sim \text{Normal}(alt_n, \sigma_{obs,n})$

$\log(\sigma_{obs,n}) = \beta_{0,obs} + \beta_{hdop} HDOP_n$

avec $alt_{obs,n}$ la mesure GPS d'altitude pour l'observation *n*, normalement distribuée autour de alt_n la vraie altitude pour l'observation *n*, et $\sigma_{obs,n}$ la déviation standard du processus d'observation définie par l'intercept $\beta_{0,obs}$ et β_{hdop} le coefficient pour l'effet de HDOP pour l'observation *n*. Pour les sternes, les valeurs de HDOP n'étaient pas disponibles et nous avons modélisé seulement l'intercept.

- processus biologique:

$alt_{n,i} \sim \text{LogNormal}(\mu_{alt,i}, \sigma_{alt,i})$

$\log(\mu_{alt,i}) = \gamma_{0,\mu_alt,i} + \boldsymbol{\Sigma}\beta_{\mu_alt} X$

$\log(\sigma_{alt,i}) = \gamma_{0,\sigma_alt,i} + \boldsymbol{\Sigma}\beta_{\sigma_alt} X$

$\gamma_{0,\mu_alt,i} \sim \text{Normal}(\beta_{0,\mu_alt}, \sigma_{0,\mu_alt})$

$\gamma_{0,\sigma_alt,i} \sim \text{Normal}(\beta_{0,\sigma_alt}, \sigma_{0,\sigma_alt})$

avec $alt_{n,i}$ la vraie altitude pour l'observation *n* pour l'oiseau *i*, $\mu_{alt,i}$ et $\sigma_{alt,i}$ la moyenne et la déviation standard de la distribution log-normal pour l'oiseau *i*, respectivement. Chaque paramètre dépend des coefficients β's associés aux prédicteurs des conditions marines *X* (vitesse du vent, direction relative du vent, et hauteur des vagues) et d'un intercept individuel aléatoire $\gamma_{0,i}$ appartenant à une distribution normale de moyenne β_0,

l'intercept populationnel, et de déviation standard σ_0. Les paramètres à estimer étaient $\beta_{0,obs}$, β_{hdop}, β_{0,μ_alt}, σ_{0,μ_alt}, β_{μ_alt}'s, β_{0,σ_alt}, σ_{0,σ_alt}, β_{σ_alt}'s.

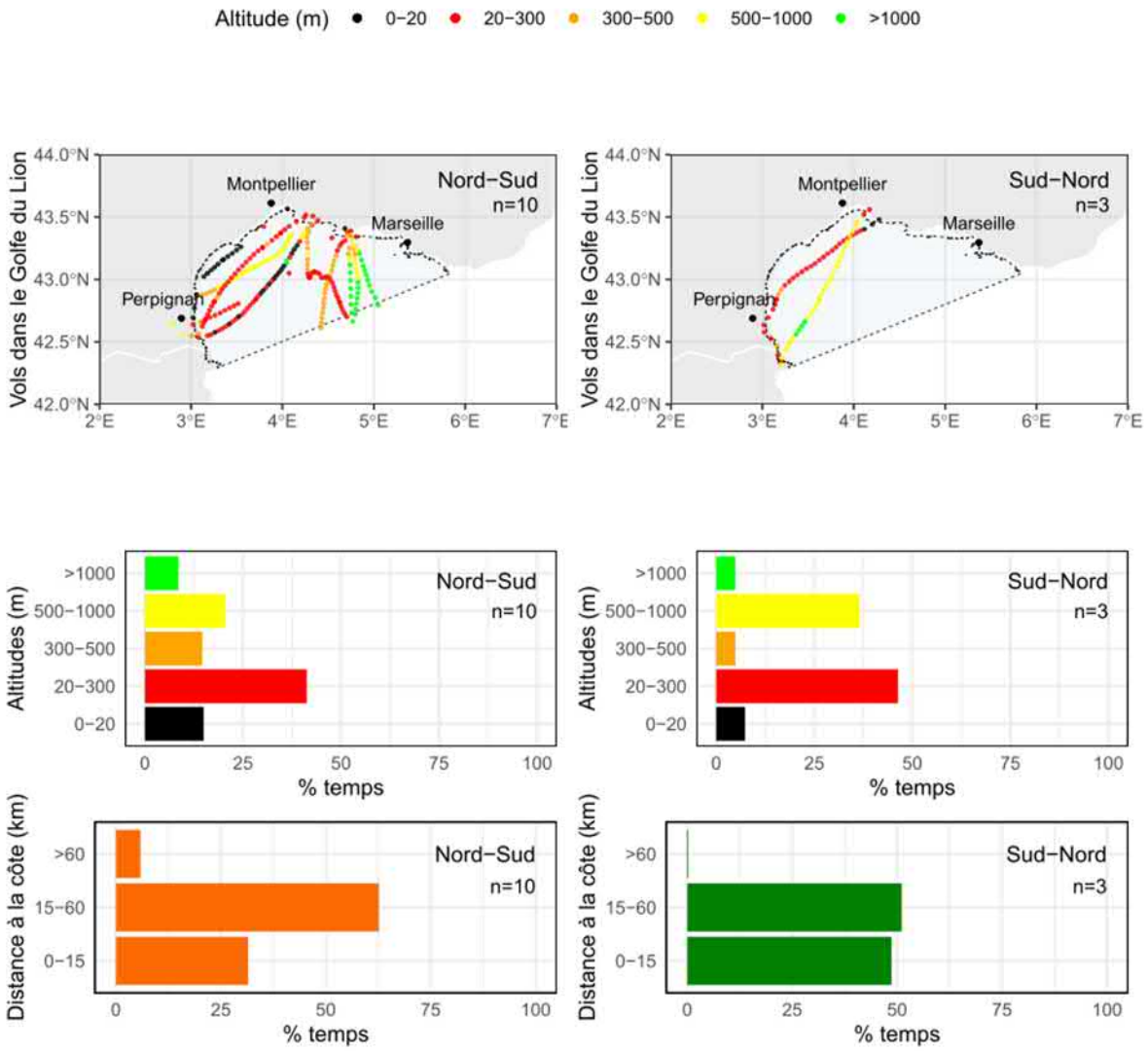
Nous avons ajusté un modèle espace-état pour chaque espèce en utilisant une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) avec le package R nimble (de Valpine et al., 2017; de Valpine et al., 2022). Nous avons utilisé des distributions peu informatives pour tous les priors, avec Normal(μ=0, σ=2) pour les intercepts et les coefficients de régressions, et Gamma(α=1, θ=1) pour la déviation standard des effets aléatoires individuels. Les valeurs initiales ont été fixées à 0 pour les intercepts et les coefficients de régression, et à 1 pour les écarts types des effets aléatoires individuels. Pour chaque modèle, nous avons ajusté trois chaînes MCMC avec au moins 120 000 itérations par chaîne, 20 000 itérations brûlées et un paramètre thin ≥ 5. Nous avons évalué la convergence des modèles en se basant sur une inspection visuelle des traces, un test de Gelman (Gelman et al., 2013) et les tailles d'échantillon effectives. La vitesse du vent et la hauteur des vagues étaient fortement corrélées ($r > 0.7$) pour les puffins, et nous avons ajusté deux modèles distincts.

-

- **Annexe 2 : Fiches de synthèse de la migration au-dessus du golfe du Lion pour chaque espèce terrestre suivie par balise GPS**

Dans les pages qui suivent, nous présentons une représentation standardisée des trajectoires de vol au-dessus du golfe du Lion, pour chacune des 19 espèces terrestres suivies par balise GPS, en distinguant la migration nord-sud (généralement à l'automne, à gauche) de la migration sud-nord (généralement au printemps, à droite). Sur les cartes, les trajectoires ont été limitées au contour du golfe du Lion et les codes couleurs des points montrent les hauteurs de vol sur 5 classes de hauteur (0-20 m, 20-300 m, 300-500 m, 500-1000 m, > 1000 m). Les graphes en dessous représentent les proportions de temps passées dans chacune des 5 classes de hauteur, et dans trois classes de distance à la côte (0-15 km, 15-60 km, > 60 km).

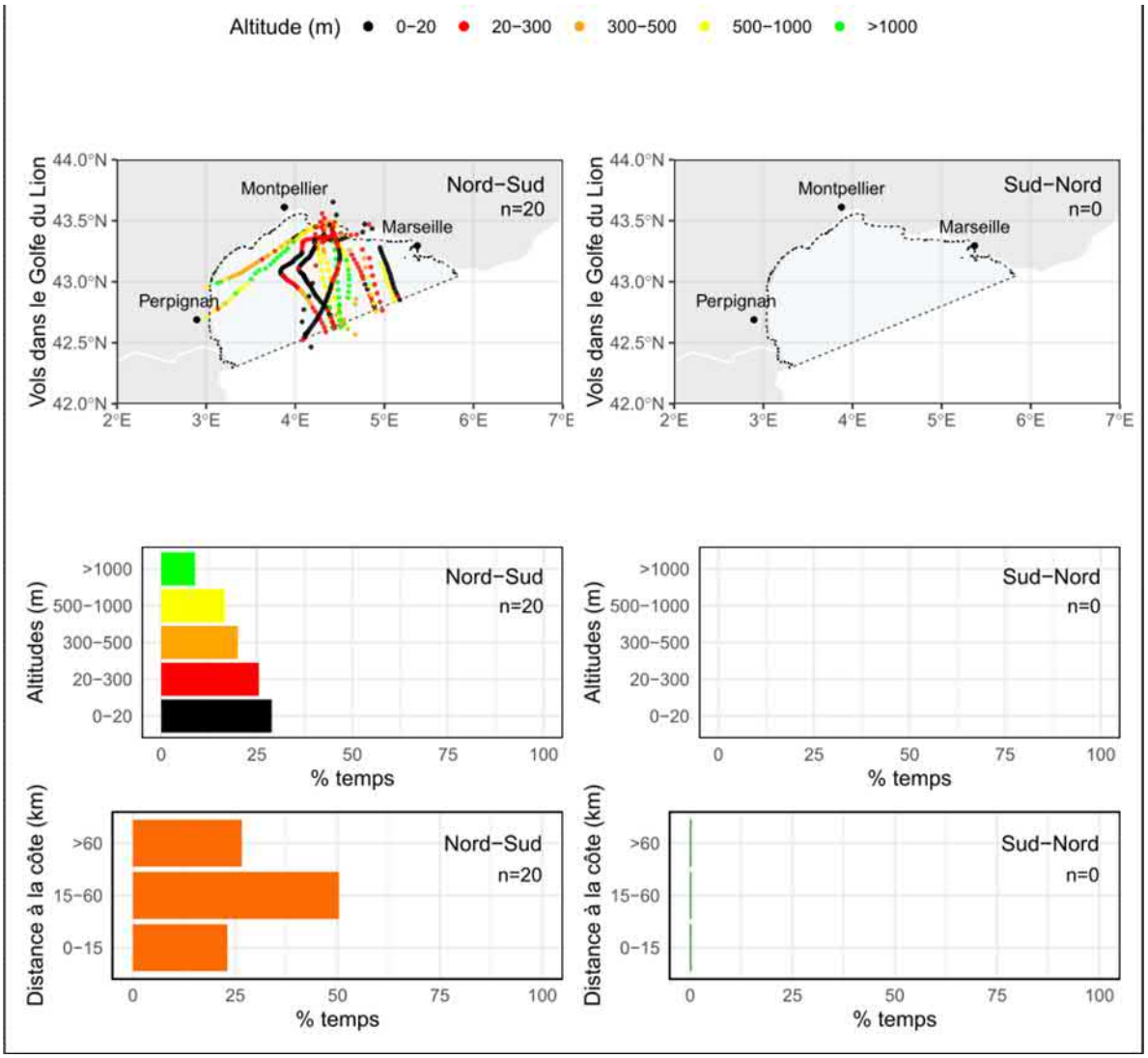
- ***Héron pourpré Ardea purpurea***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**13/09**	14/07	28/10	**29/09**	01/09	31/10	14
Sud-Nord	**18/04**	01/04	28/05	**28/04**	05/04	29/05	4

Migrateur trans-saharien strict. Le héron pourpré adopte une stratégie de traversée directe à haute altitude ou en diagonale via l'Espagne à basse altitude à l'automne, et un retour majoritairement via l'Espagne en coupant le golfe du Lion en diagonale au printemps

- ***Crabier chevelu Ardeola ralloides***



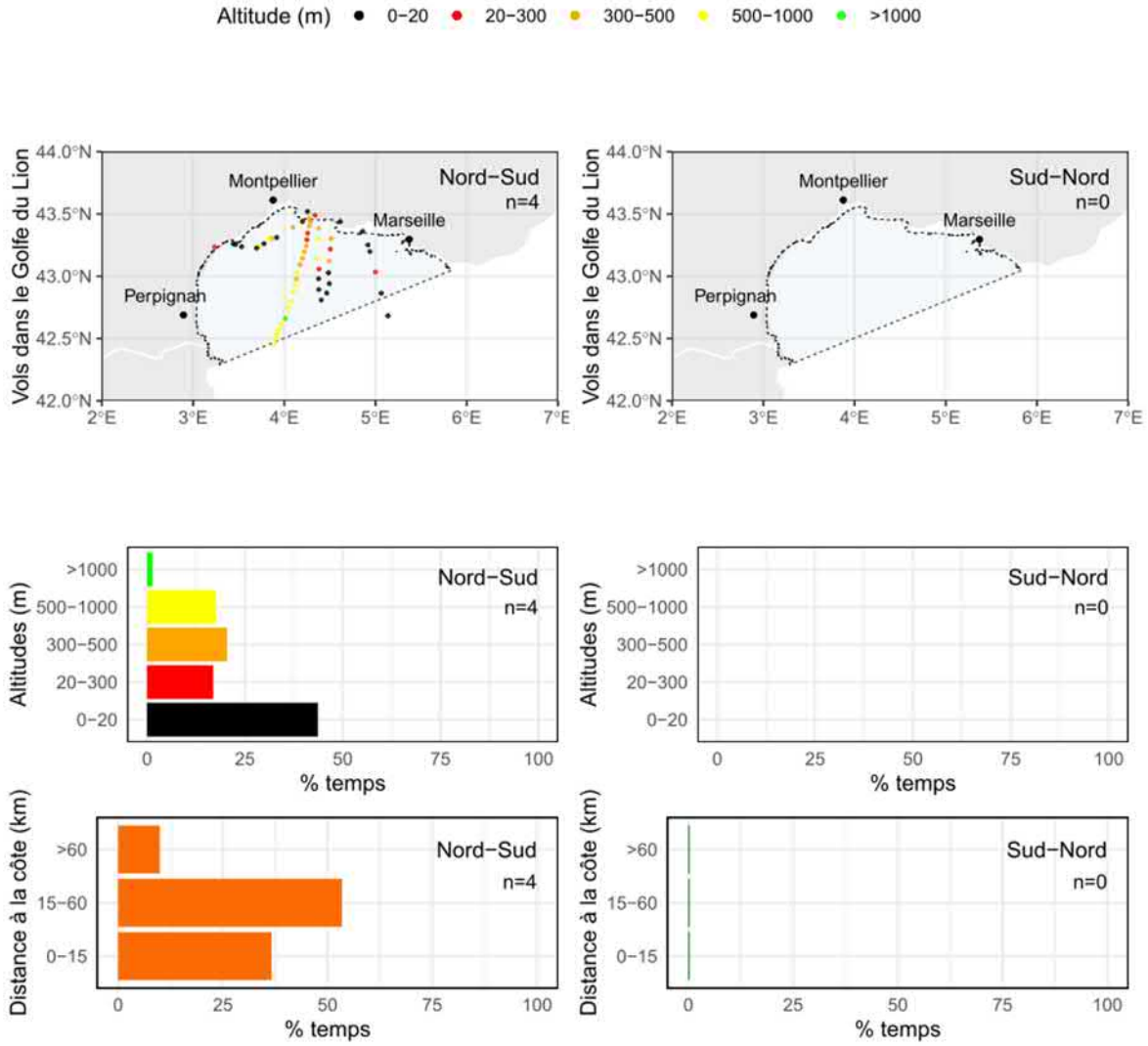
Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**04/09**	18/08	04/10	**11/09**	20/08	18/10	18
Sud-Nord	**28/04**	28/04	28/04				1

Migrateur trans-saharien strict. Hivernant en Afrique de l'Ouest, 90% des individus ont traversé le golfe du Lion directement par le large, mais à des hauteurs très variées, entre 0 et 1000 m. plusieurs individus ont passé plusieurs années en Afrique. Le seul individu revenu en France est arrivé le 12 mai 2025, après le bouclage des analyses.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Blongios nain Ixobrychus minutus***

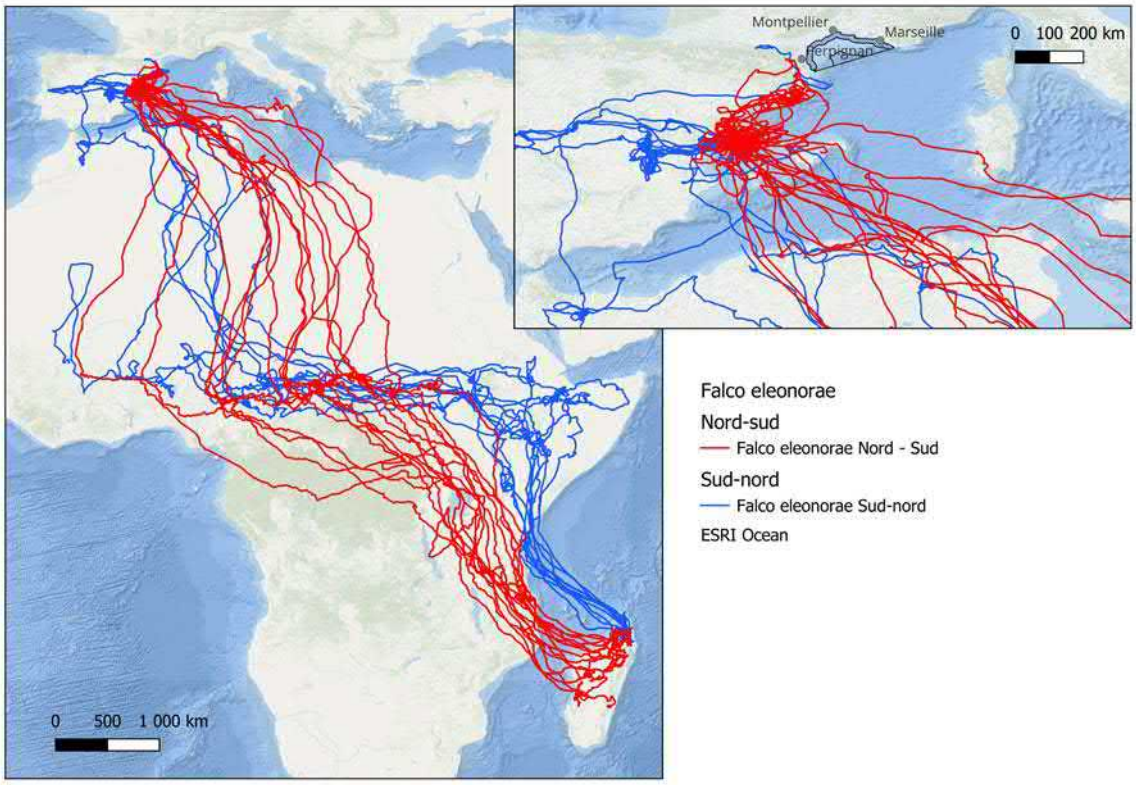


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**15/08**	09/07	22/09	**04/09**	23/07	24/09	4

Migrateur trans-saharien strict, mais un des individus que nous avons équipé a passé tout l'hiver 2024-25 en Camargue sur son site de nidification. Les quelques individus qui ont fourni des données de migration ont montré des comportements de traversée du golfe très variés en termes de stratégie, comme de hauteur de vol. Nous avons subi beaucoup de pannes de balises sur cette petite espèce, et aucun oiseau n'a fourni de données de migration Sud-Nord.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

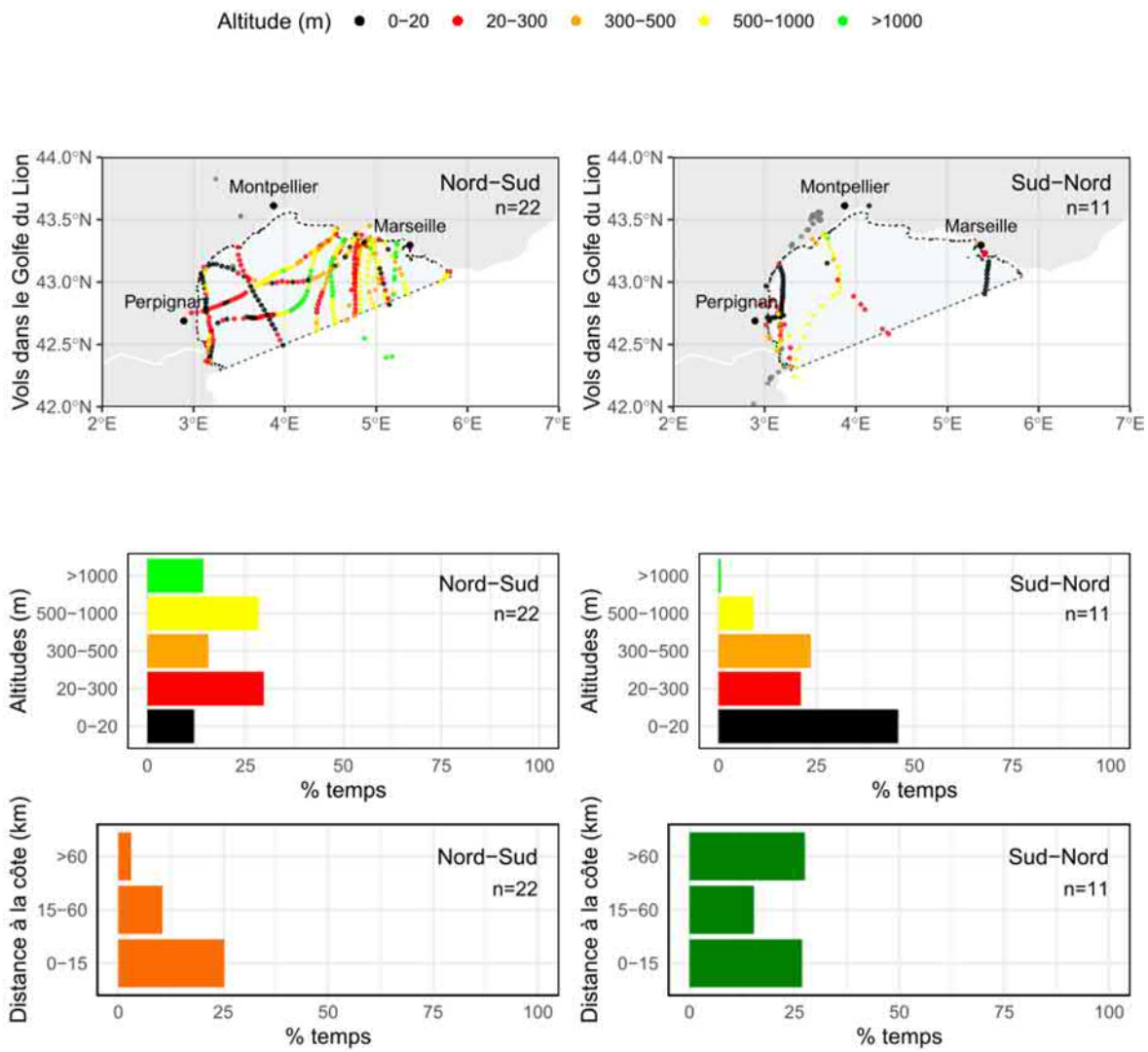
- ***Faucon d'Eléonore Falco eleonorae***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**25/10**	20/10	31/10	**25/11**	27/10	15/12	16
Sud-Nord	**19/04**	11/04	17/05	**28/05**	29/04	29/06	11

Migrateur trans-saharien strict. Tous les faucons d'Eléonore hivernent à Madagascar. Ils reviennent en Mai en Europe et peuvent se disperser le long du littoral languedocien avant de revenir sur leur sites de reproduction en fin d'été. Aucun des faucons équipés sur l'île espagnole de Columbretes, près des Baléares, n'a utilisé le golfe du Lion. Toutefois tous les déplacements enregistrés au dessus de la mer l'ont été à haute altitude, >1000 m.

- ***Faucon crécerellette Falco naumanni***



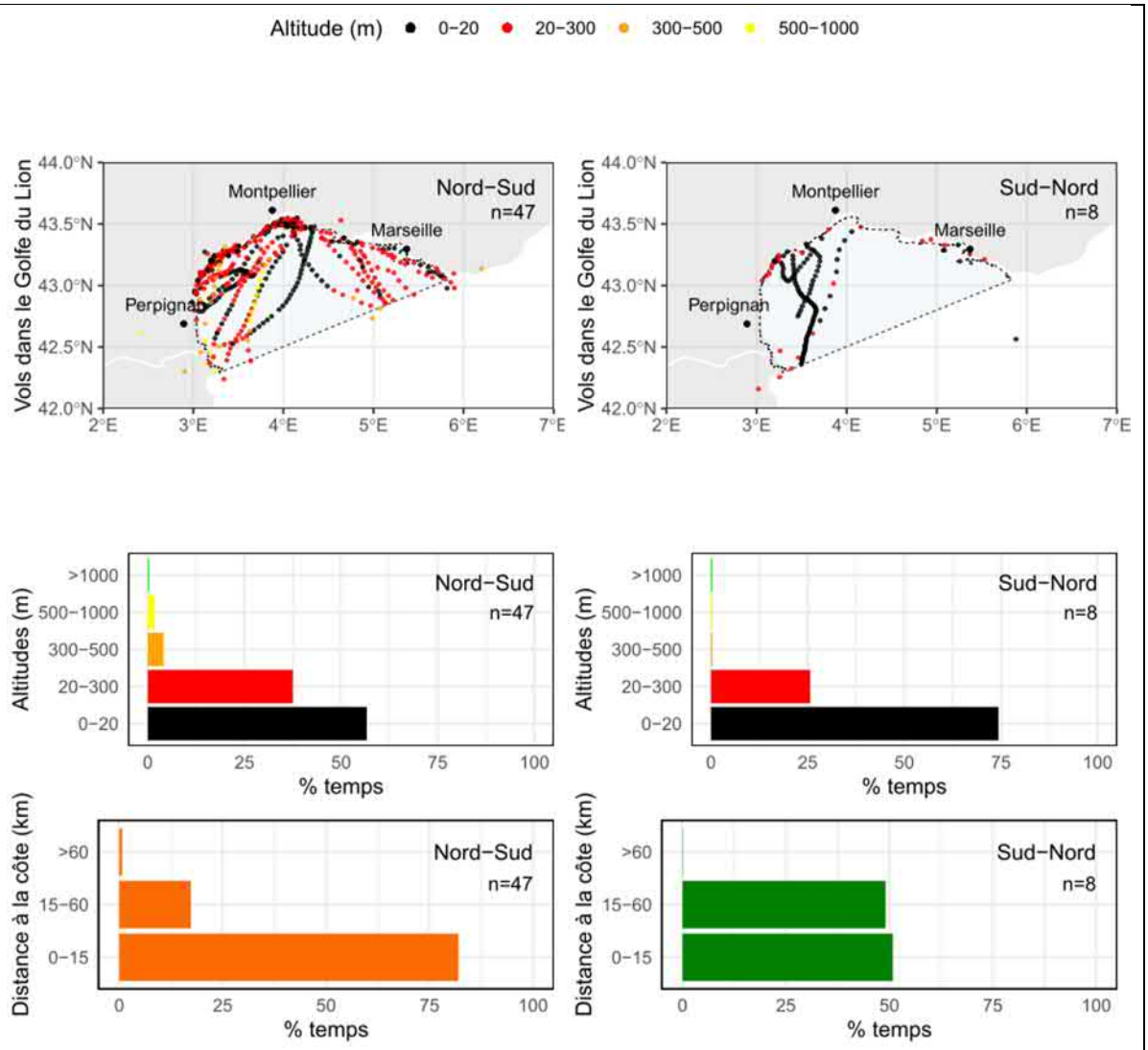
Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**12/09**	08/05	10/10	**09/10**	16/09	30/12	49
Sud-Nord	**22/03**	23/01	24/11	**08/04**	24/03	23/06	35

Migrateur trans-saharien strict. Tous les faucons crécerellette ont hiverné entre le Mali et le Sénégal. La majorité des individus ont traversé le golfe du Lion directement par le large, surtout à l'automne. Au printemps, la plupart des individus ont longé la côte vers l'Espagne. Les hauteurs de vol étaient très variables entre individus et au sein d'un même vol.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Flamant rose Phoenicopterus roseus***



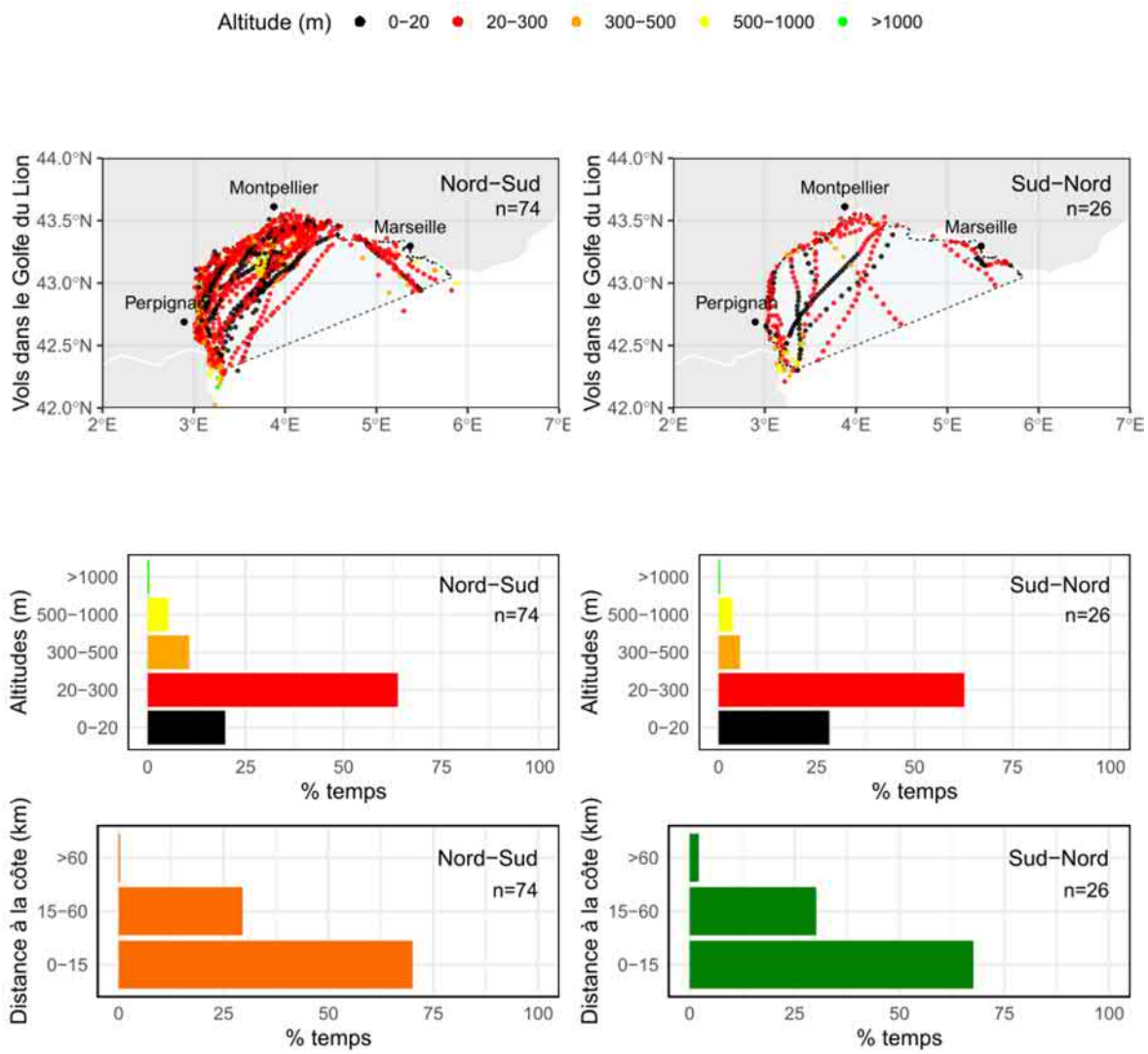
Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**25/08**	12/02	17/12	**08/09**	13/02	25/12	48
Sud-Nord	**15/04**	10/01	12/10	**19/04**	10/01	15/10	15

Migrateur partiel, le flamant rose se disperse le long du bassin Méditerranéen. Les jeunes oiseaux bagués qui sont partis en migration l'ont fait en automne, majoritairement en longeant la côte, mais aussi en coupant le golfe du Lion en diagonale vers l'Espagne ou en partant vers l'Est, à destination de la Sardaigne. La majorité des survols marins sont effectués entre 0 et 300m

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Spatule blanche Platalea leucorodia***



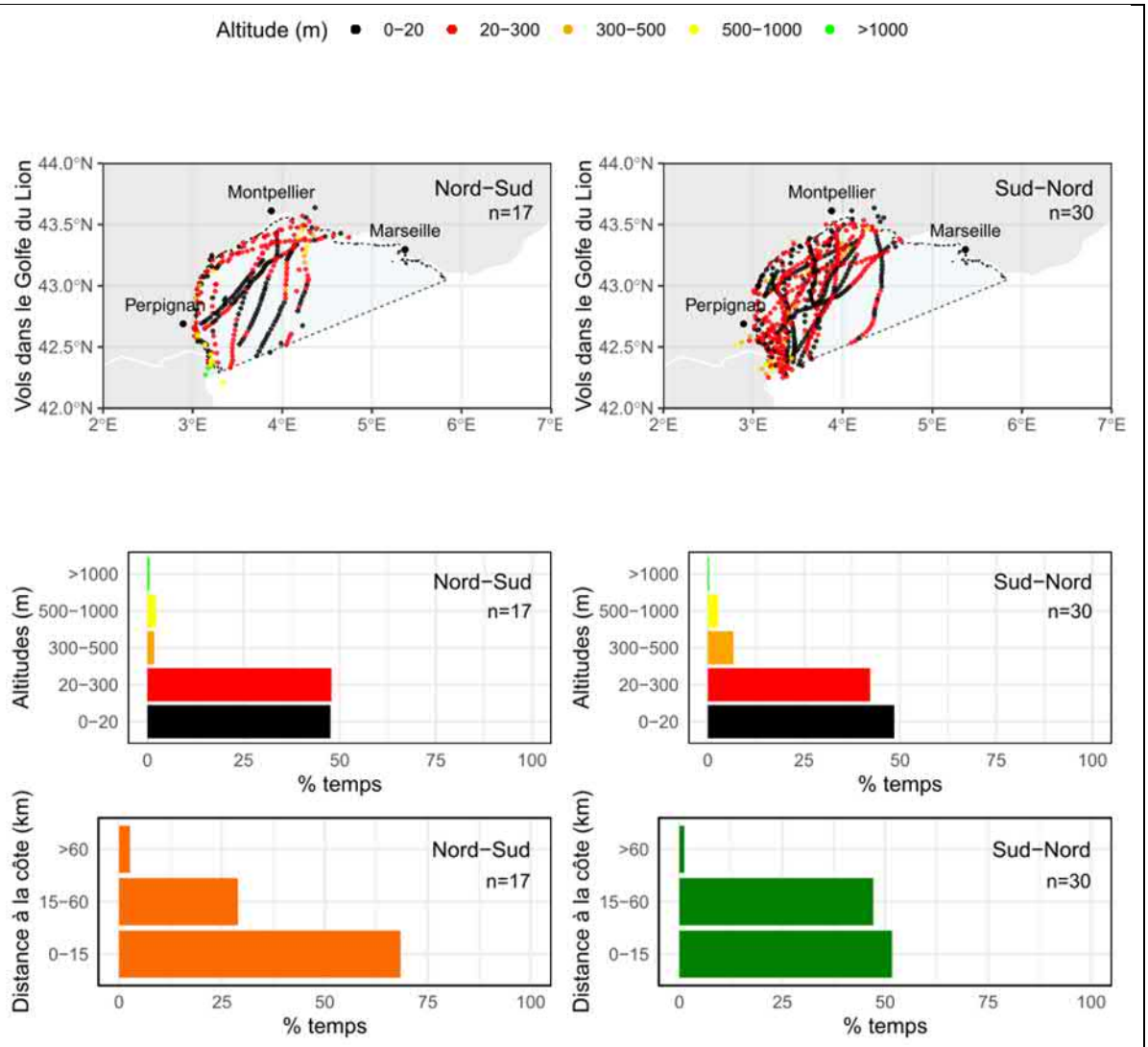
Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**20/09**	26/07	22/10	**29/09**	27/07	18/11	48
Sud-Nord	**12/04**	11/03	03/06	**23/04**	11/03	21/06	21

Migrateur partiel. 84% des oiseaux équipés en Camargue ont montré un comportement migratoire, principalement pour aller en Espagne ou en Afrique de l'Ouest en longeant la côte Atlantique de l'Afrique. Dans ce cas, les oiseaux ont longé la côte ou coupé en diagonale. Quelques oiseaux ont hiverné en Sardaigne ou en Tunisie, traversant le golfe directement vers l'Est et le large. Tous les survols ont été réalisés à basse altitude.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Ibis falcinelle Plegadis falcinellus***

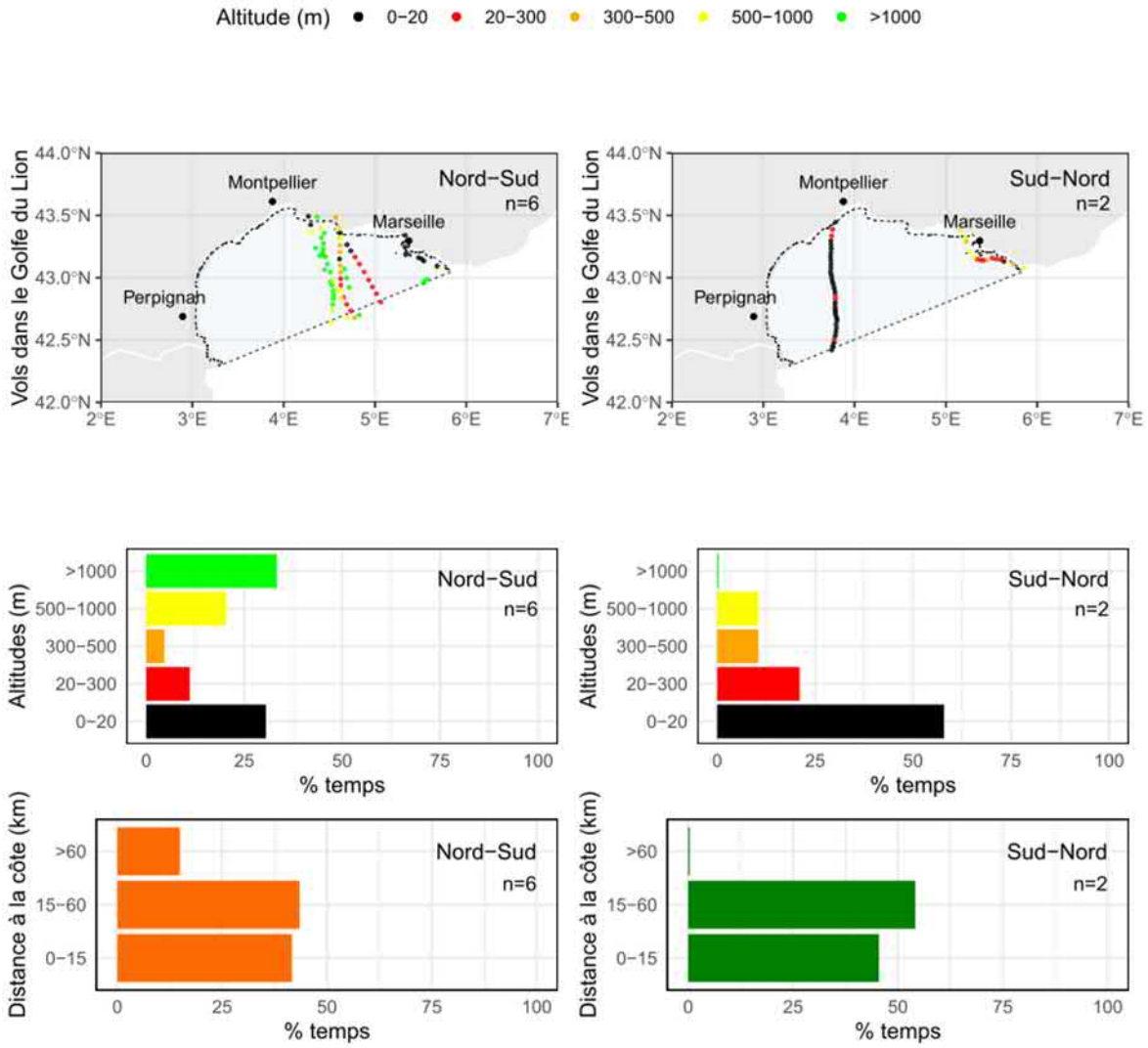


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**04/07**	13/04	17/12	**14/07**	14/04	18/12	33
Sud-Nord	**23/03**	10/03	12/04	**26/05**	01/01	31/12	23

Migrateur partiel. La totalité des déplacements ont été entre la France et l'Espagne, principalement autour du Delta de l'Ebre, en Catalogne, ou vers l'Andalousie. Les déplacements pouvaient avoir lieu à tout moment de l'année,avec globalement des déplacements Nord-Sud en début d'été, et des déplacements Sud-Nord en hiver. Toutes les traversées du golfe du Lion ont été réalisées à basse altitude, en longeant la côte ou en diagonale.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

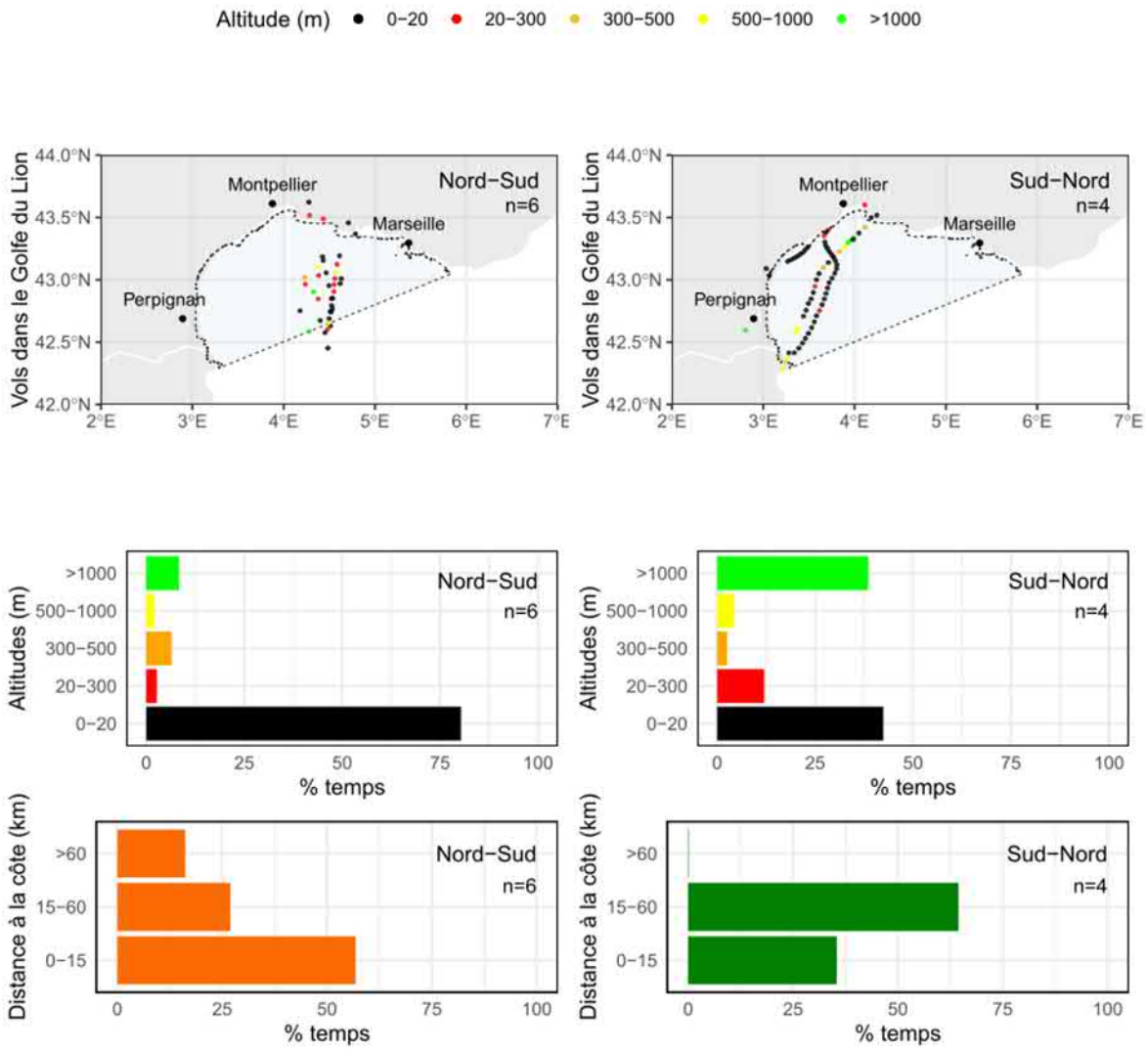
- ***Glaréole à collier Glareola pratincola***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**04/09**	09/08	27/09	**13/09**	25/08	04/10	6
Sud-Nord	**03/05**	09/04	07/05	**23/04**	12/04	05/05	2

Migrateur trans-saharien strict. Toutes les traversées du golfe du Lion ont été effectuées directement vers le large, soit à très haute altitude >1000 m, soit à très basse altitude. Les périodes de migration étaient très concentrées, et la durée de migration ne totalisait que quelques jours: un individu a quitté le Mali et est arrivé en France 3 jours plus tard, d'un vol non-stop

- ***Echasse blanche Himantopus himantopus***

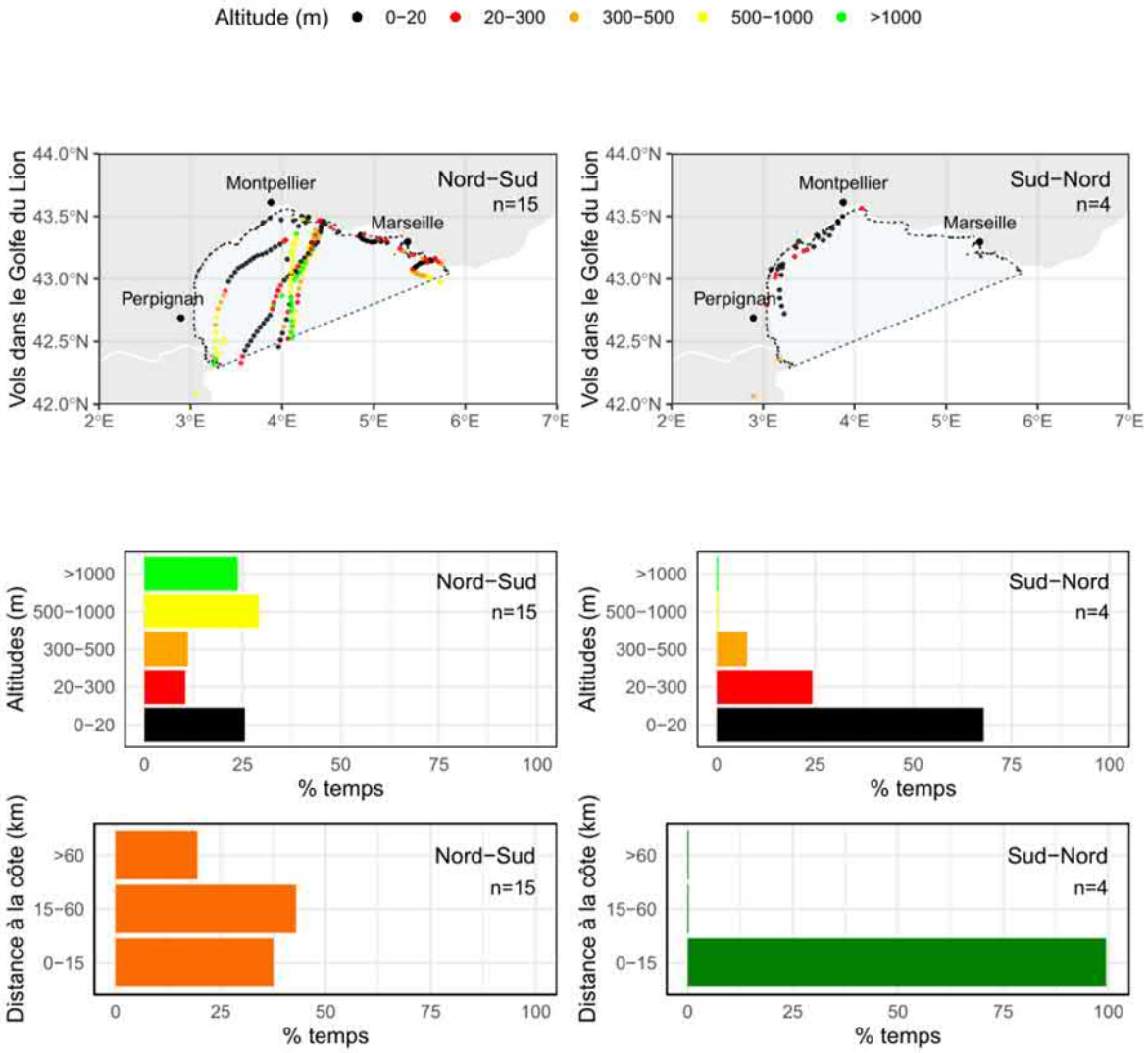


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**05/08**	01/06	23/09	**28/08**	08/06	11/11	12
Sud-Nord	**01/04**	10/03	21/04	**18/04**	25/03	05/06	10

Migrateur trans-saharien principalement. À l'automne, la majorité des oiseaux ont emprunté les voies directes vers le large ou en diagonale via l'Espagne, généralement à très basse altitude. Au printemps, les oiseaux ont principalement volé en longeant la côte ou en diagonale, pour partie à très basse altitude, et pour partie à très haute altitude >1000 m. Les périodes de migration sont étalées sur plusieurs mois.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Avocette élégante Recurvirostra avosetta***



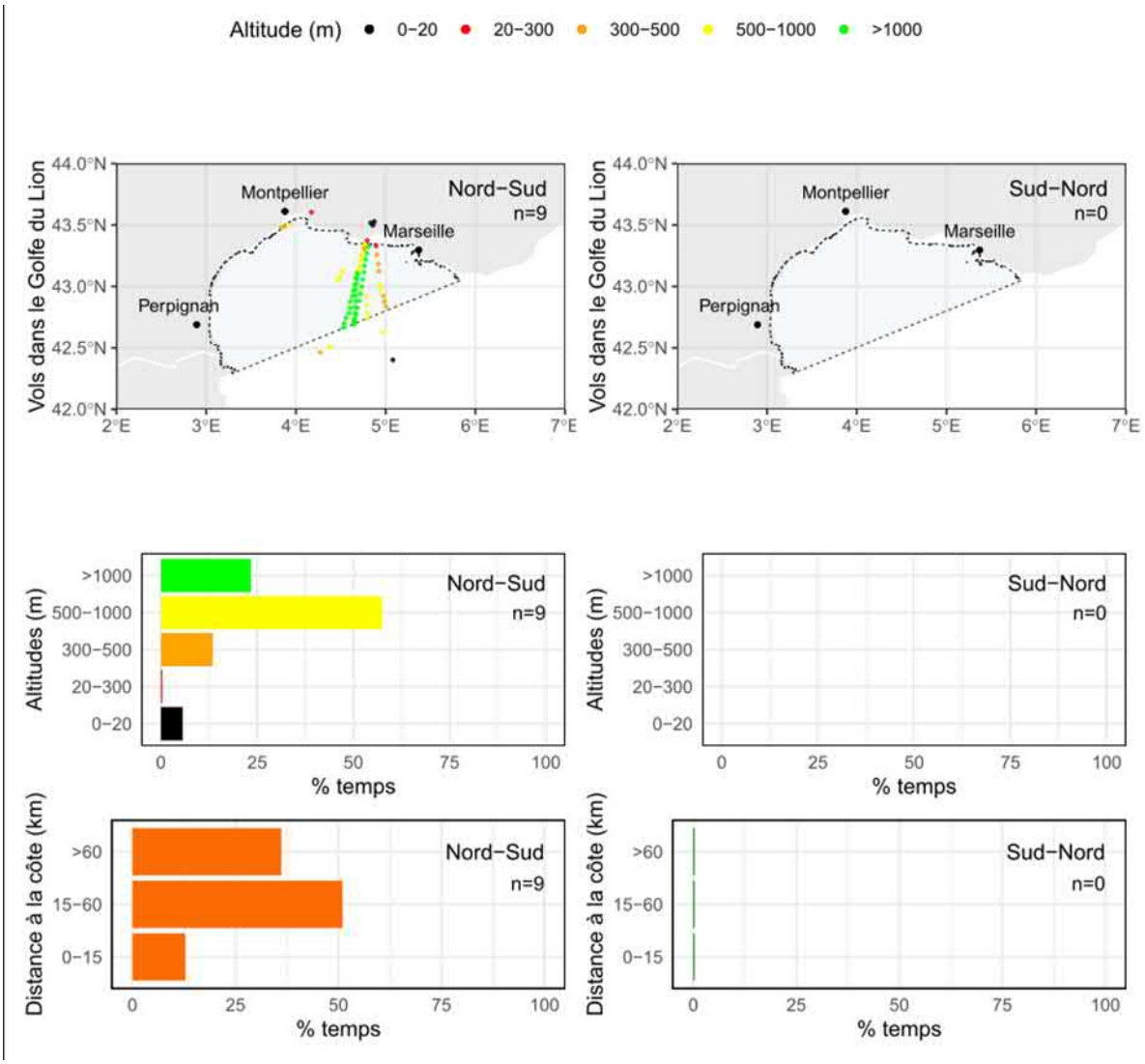
Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**26/09**	04/01	05/12	**06/10**	05/01	23/12	13
Sud-Nord	**23/03**	10/03	12/04	**08/04**	15/03	24/04	7

Migrateur partiel. Une partie des oiseaux hiverne en France, une partie en Péninsule Ibérique et une partie en Afrique de l'Ouest. A l'automne, les traversées du golfe du Lion ont utilisé les trois stratégies. Les oiseaux empruntant la route du large étaient plutôt à haute altitude >500 m alors que ceux longeant la côte volaient plus bas. Au printemps, tous les individus sont revenus via l'Espagne, en majorité en longeant la côte ou en diagonale, toujours à altitude <300 m. Les périodes de migration sont étalées sur plusieurs mois.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

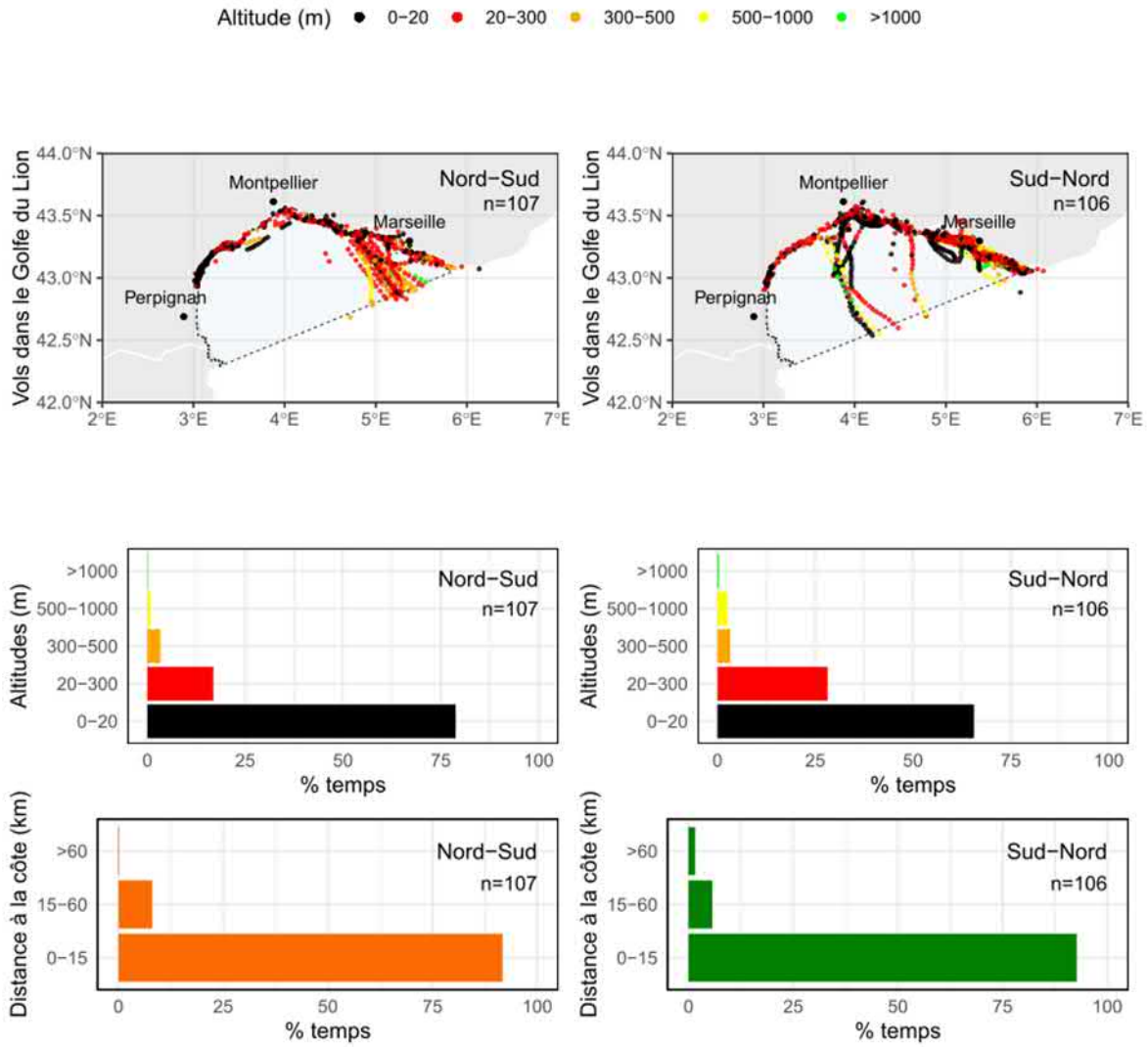
- ***Pluvier guignard Charadrius morinellus***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**28/09**	31/08	09/11	**30/09**	04/09	09/11	13

Migrateur strict. Le pluvier guignard hiverne dans les steppes désertiques du Maghreb. Les traversées du golfe du Lion ont toutes été effectuées directement vers le large ,à des hauteurs >300m. Les départs étaient étalés sur deux mois. Aucun retour printanier n'a pu être enregistré, du fait de pannes de balises ou de mortalité sur les sites d'hivernage.

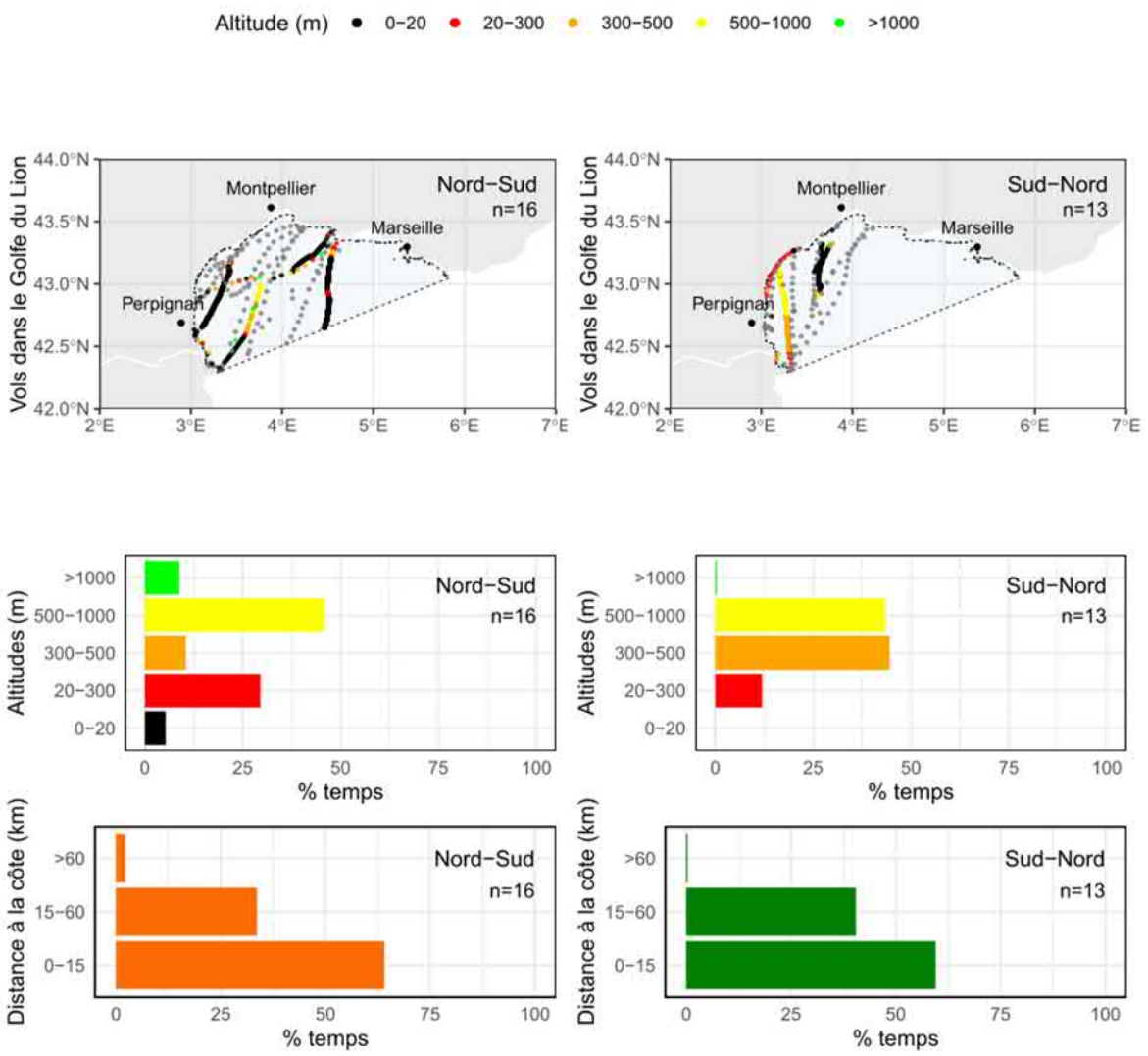
- ***Goéland railleur Chroicocephalus genei***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**30/09**	08/05	10/12	**05/10**	09/05	19/12	24
Sud-Nord	**29/03**	04/03	05/06	**01/04**	05/03	08/06	20

Migrateur partiel. Alors qu'une partie des individus reste toute l'année sur le littoral français, une partie hiverne en Afrique du Nord, majoritairement en Tunisie. La majorité des individus effectue des traversées directes vers la Tunisie ou via la Sardaigne, toujours à très basse altitude, à l'automne comme au printemps. Hors période de migration, il existe également des déplacements le long de la côte.

- ***Mouette rieuse Chroicocephalus ridibundus***

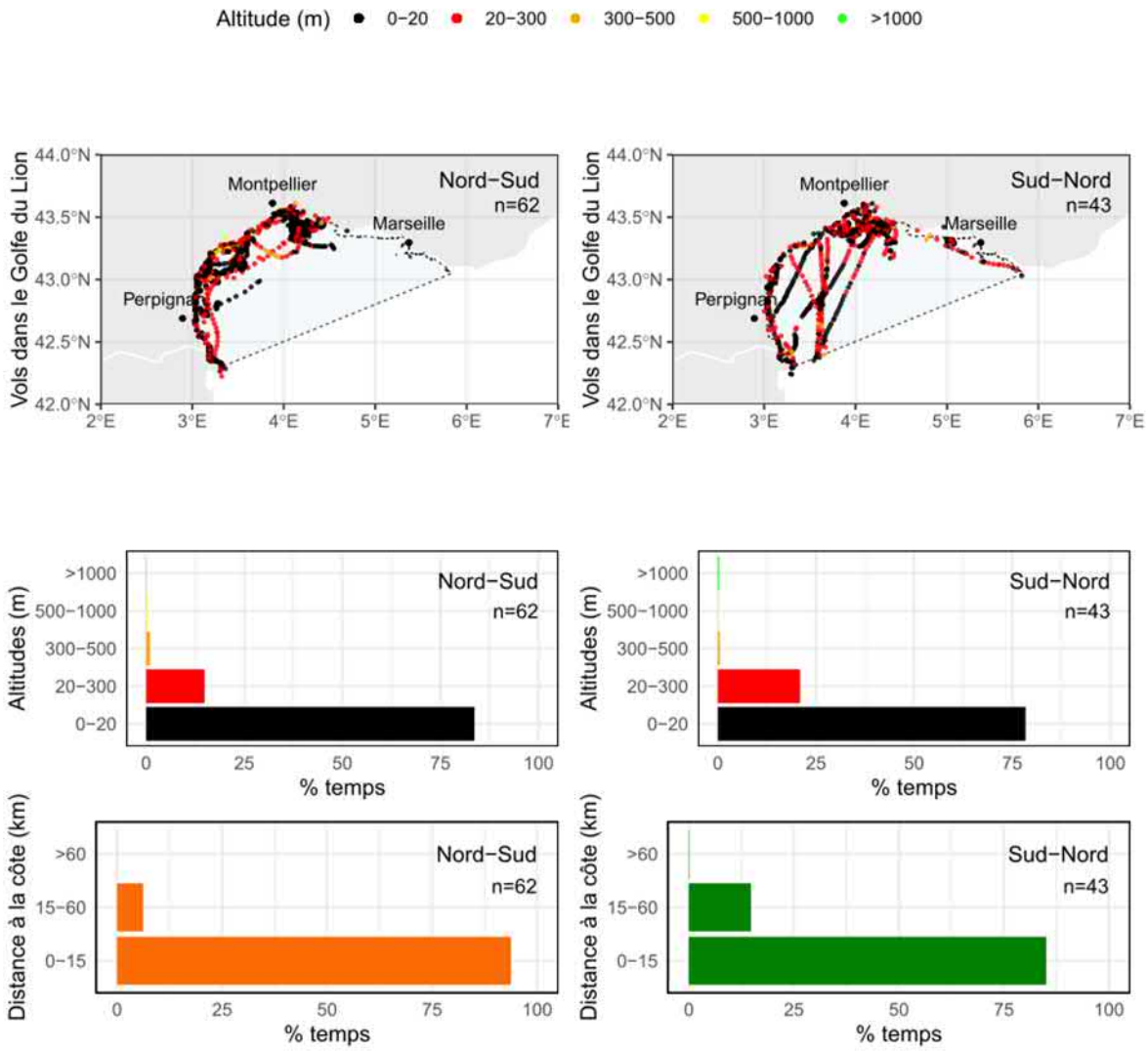


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**15/08**	06/06	30/10	**18/08**	06/06	31/10	34
Sud-Nord	**08/03**	14/02	30/03	**10/03**	14/02	08/04	24

Migrateur partiel. Une partie des individus hiverne en France et une autre partie se disperse dans le bassin Méditerranéen, principalement en Péninsule Ibérique. La grande majorité des individus traverse le golfe du Lion en longeant la côte ou en coupant en diagonale vers l'Espagne, dans les deux sens de migration. Les hauteurs de vol sont intermédiaires, entre 20 et 1000 m.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Mouette mélanocéphale Ichthyaetus melanocephalus***

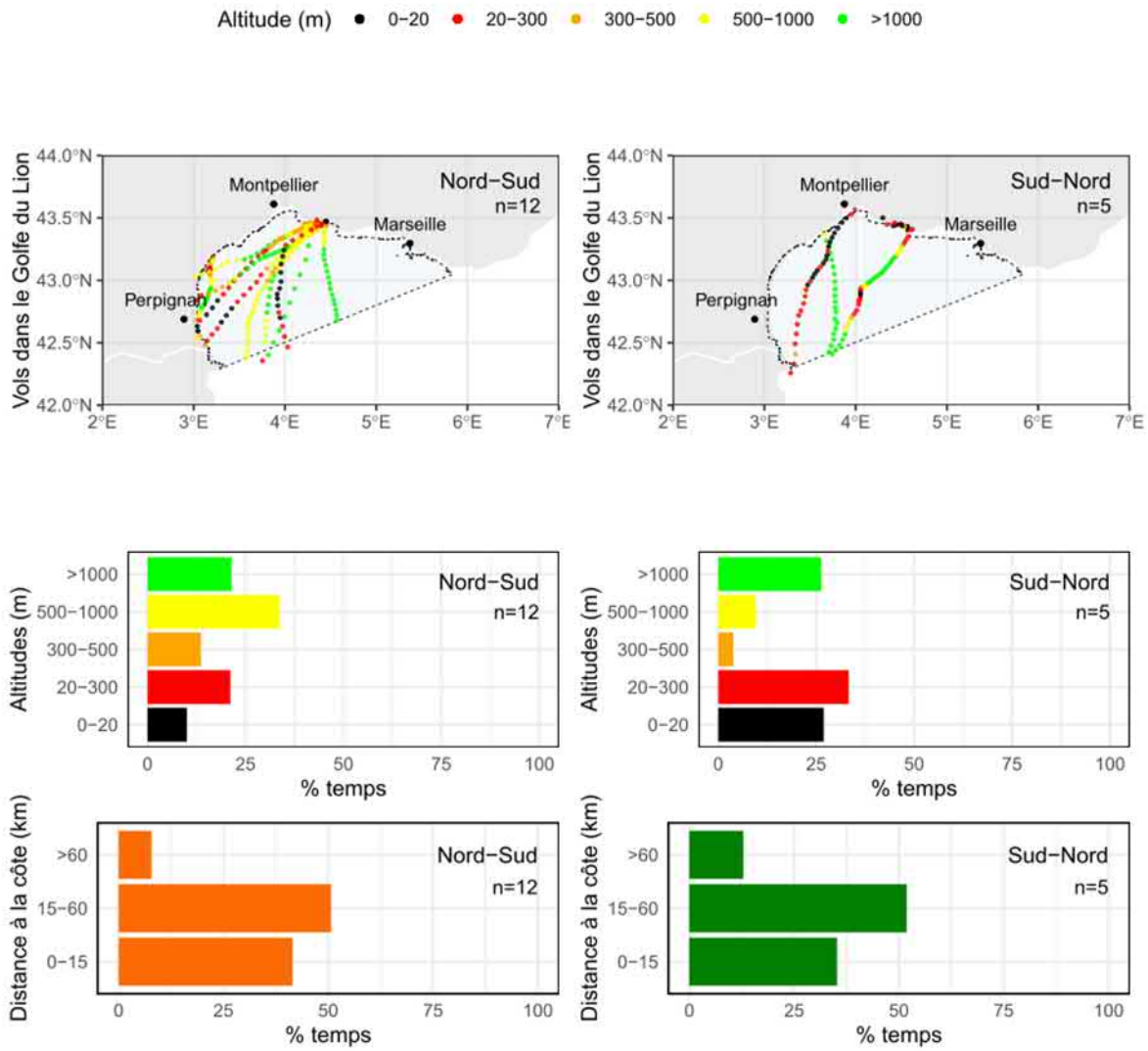


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**01/08**	01/07	07/11	**22/09**	02/07	20/12	16
Sud-Nord	**04/03**	02/02	30/03	**20/03**	04/02	15/04	9

Migrateur partiel. Cette espèce hiverne majoritairement sur les littoraux d'Europe méridionale, principalement en Péninsule Ibérique. Cependant nous avons enregistré des déplacements estivaux des oiseaux capturés en Camargue vers la côte Atlantique, de la Manche, jusqu'en Angleterre. La patron de migration est donc tout à fait atypique, avec des oiseaux qui traversent la France par la terre pour rejoindre la Vendée ou l'Espagne, mais également en longeant les côtes. Les traversées

du golfe du Lion ont toutes été réalisées en longeant la côte ou en diagonale, toujours à faible hauteur.

- ***Sterne hansel Gelochelidon nilotica***

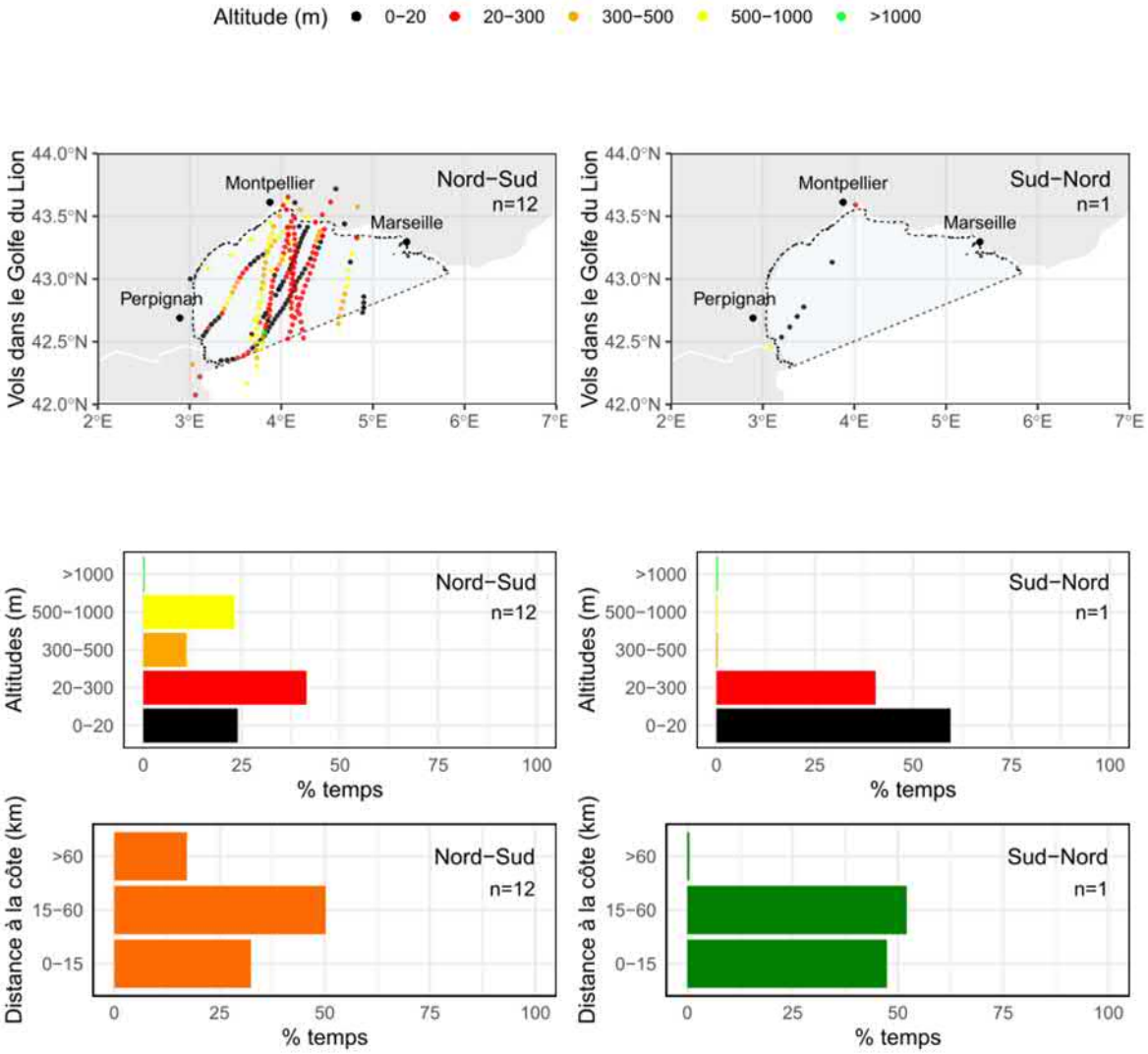


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**15/08**	21/07	10/09	**25/09**	12/08	28/11	11
Sud-Nord	**27/04**	23/04	03/05	**16/05**	29/04	31/05	5

Migrateur trans-saharien strict. La Sterne hansel hiverne en Afrique de l'Ouest ou le long du fleuve Niger. Les traversées du golfe du Lion ont majoritairement été réalisées en diagonale entre la Camargue (bastion de nidification de l'espèce) et l'Espagne, à des hauteurs variables, certains individus volant à plus de 2000 m quand d'autres volant au ras de l'eau.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Tourterelle des bois Streptopelia turtur***

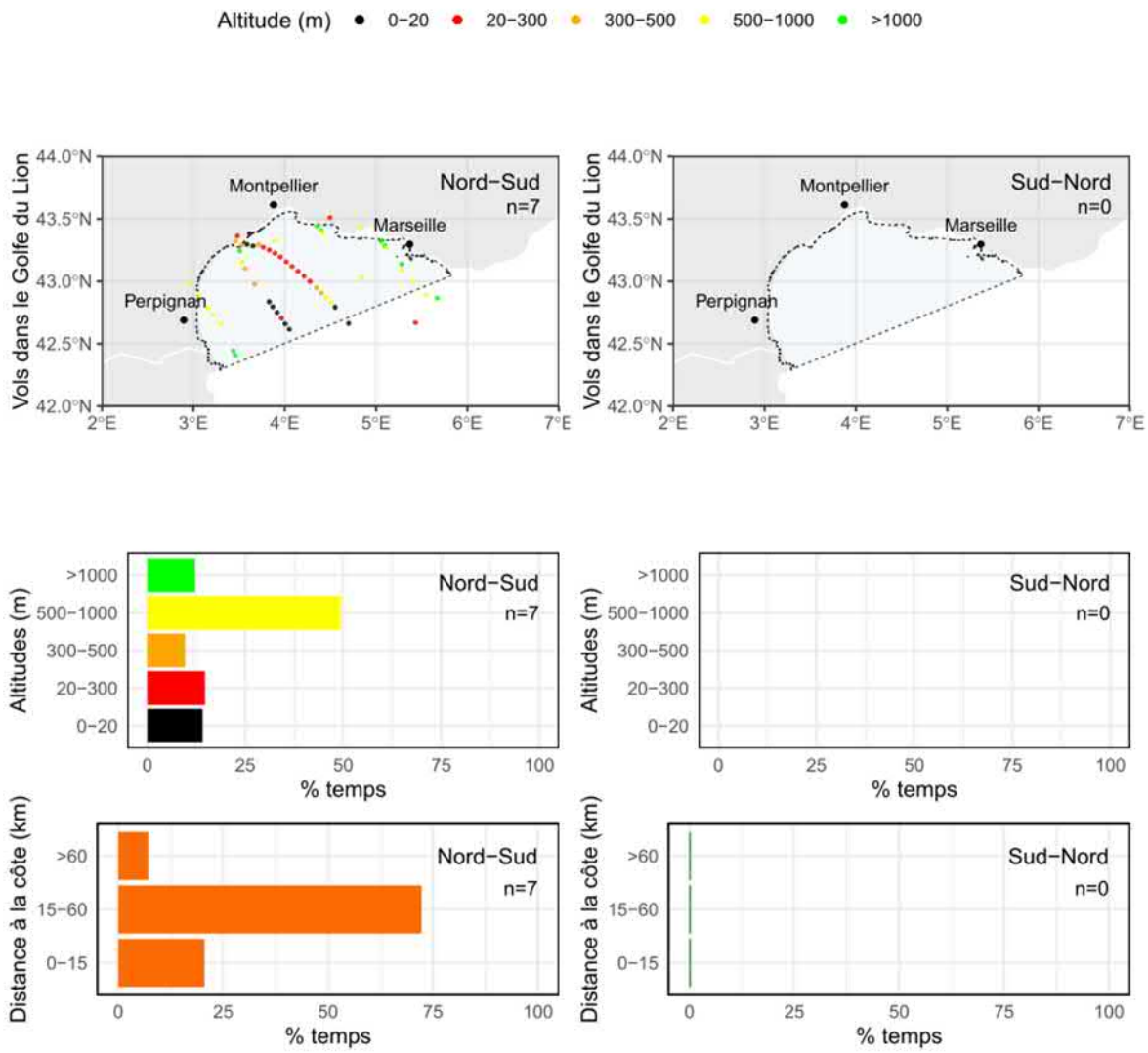


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**14/09**	08/09	23/09	**21/09**	10/09	19/10	15
Sud-Nord	**22/04**	22/04	22/04	**15/05**	15/05	15/05	1

Migrateur trans-saharien strict. À l'automne, la majorité des oiseaux part pendant le mois de septembre en adoptant une stratégie de traversée directe en mer, à des hauteurs inférieures à 500m, avec parfois une escale aux îles Baléares. Le seul retour enregistré a eu lieu via l'Espagne avec une traversée du golfe du Lion en diagonale, à faible hauteur.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Rollier d'Europe Coracias garrulus***

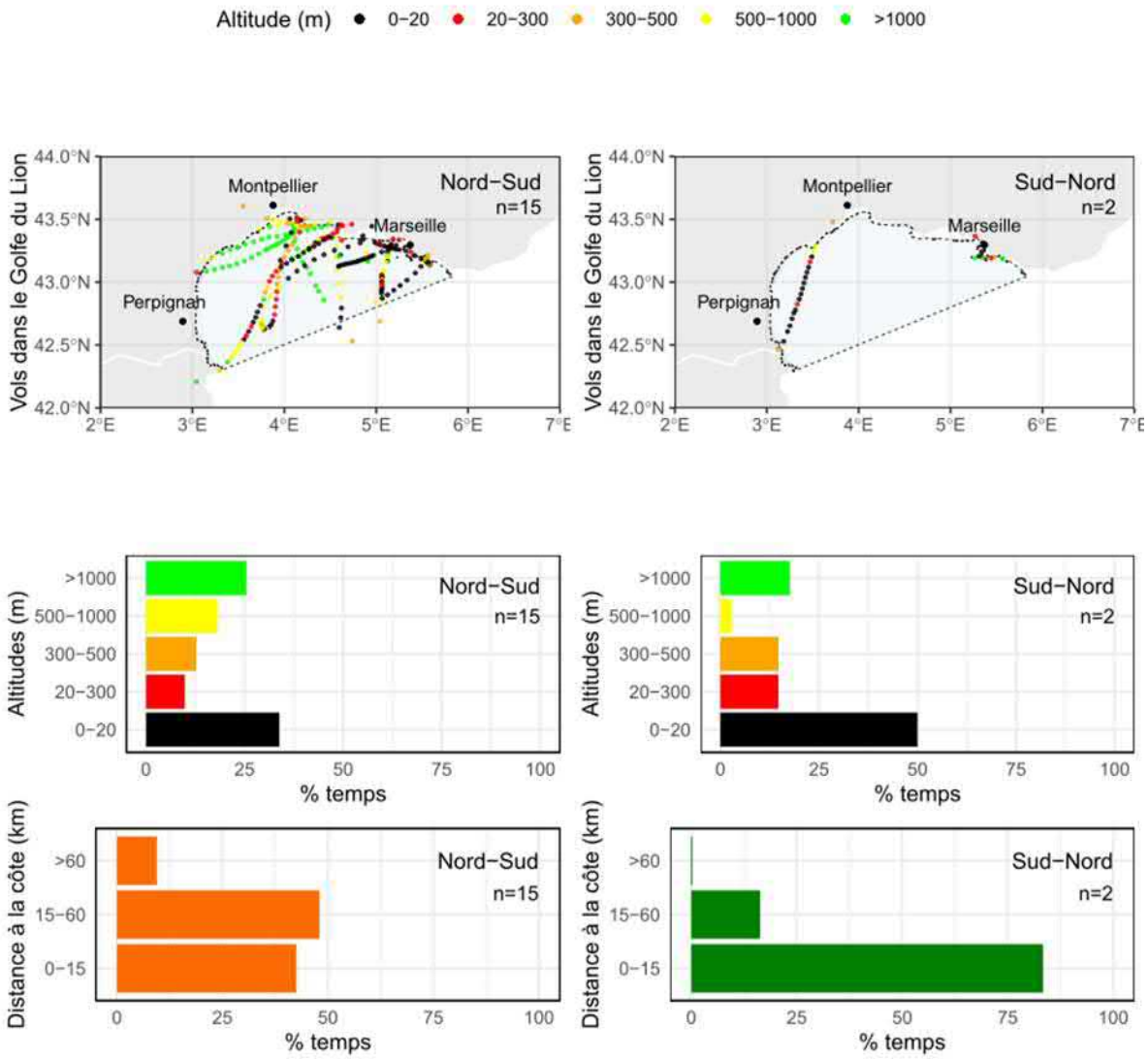


Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**14/09**	08/09	26/09	**08/12**	26/11	19/12	13
Sud-Nord	**03/03**	14/02	16/03	**07/05**	29/04	13/05	6

Migrateur trans-saharien strict. Les rolliers hivernent en Afrique Australe, entre la Namibie et le Botswana. Tous les individus ont traversé le golfe du Lion directement par le large, en direction du Sud-Est, souvent en survolant la Sardaigne, puis la Libye, Tchad etc. Les hauteurs de vol étaient majoritairement à haute altitude, mais ces résultats sont mal reflétés par nos données où beaucoup d'individus sont partis avec des balises faiblement chargées du fait de leur nidification en cavités, et n'ont pas permis d'enregistrer de nombreuses données. Pour la migration de printemps, les rolliers

sont revenus par la même route, via la Sardaigne, en accostant la France par le Var puis rejoignant leur site de reproduction par la terre, donc en évitant le golfe du Lion.

- ***Coucou geai Clamator glandarius***



Période	**moyenne date depart**	Min date depart	Max date depart	**Moyenne date arrivee**	Min date arrivee	Max date arrivee	N vols
Nord-Sud	**24/06**	01/05	27/07	**11/07**	08/05	01/09	18
Sud-Nord	**02/02**	01/02	24/12	**07/03**	05/02	07/04	4

Migrateur strict, hivernant pour partie dans le sud de l'Espagne, au Maroc et pour partie en Afrique de l'Ouest (Mauritanie et Sénégal). La majorité des oiseaux ont traversé le golfe du Lion vers le large ou en diagonale, à des hauteurs de vol très variables. Il faut noter un grand nombre de traversées Nord-Sud "avortées", avec retour en France. la phénologie de migration était atypique, avec un premier départ massif vers le sud dès le mois de Juin.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

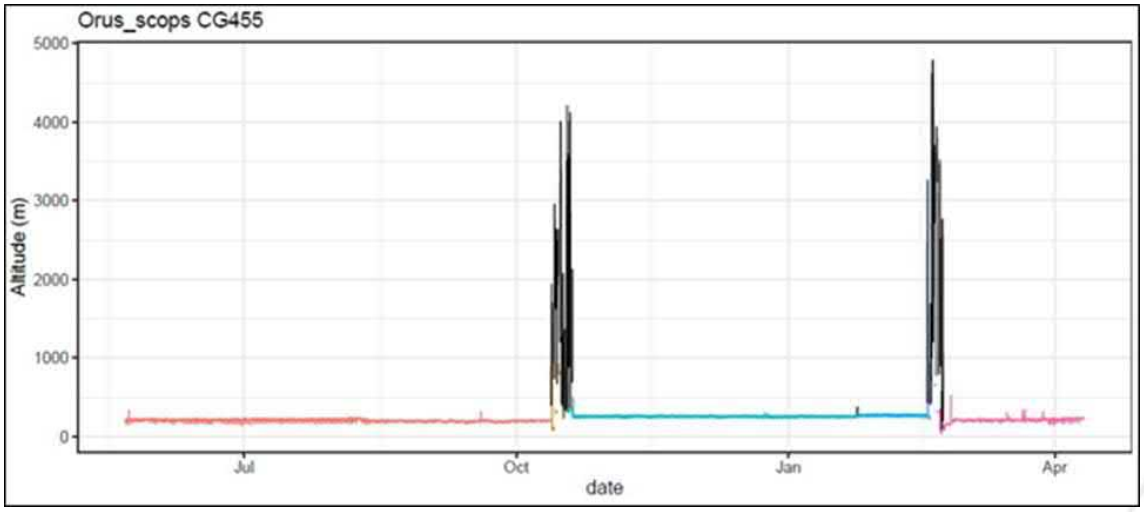
- **Annexe 3 : Fiches de synthèse de la migration pour les 19 espèces terrestres suivies par balise GLS**

- ***Petit-duc scops Otus scops***

Déploiement en 2022 sur 7 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais cordelette leg loop ajustable à l'individu par un serrage à l'arrière puis collage du nœud pouvant céder dans le temps. Masse des individus équipés : 72,4-104,5g (moyenne de 81g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0.79g, nous n'avons pas dépassé 1% de la masse moyenne. Pas de baguage couleur (inutile sur une espèce nocturne), pas de groupe contrôle. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical, en ciblant les postes de chant avec repasse ou les cavités actives de reproduction. Recaptures réalisées en 2023 d'avril à mai de 4 individus équipés, soit un taux de 57% de récupération de GLS. Tous les GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.





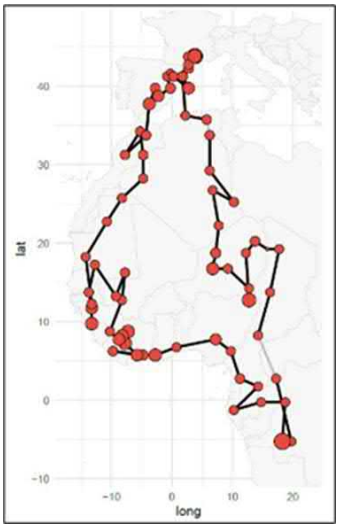


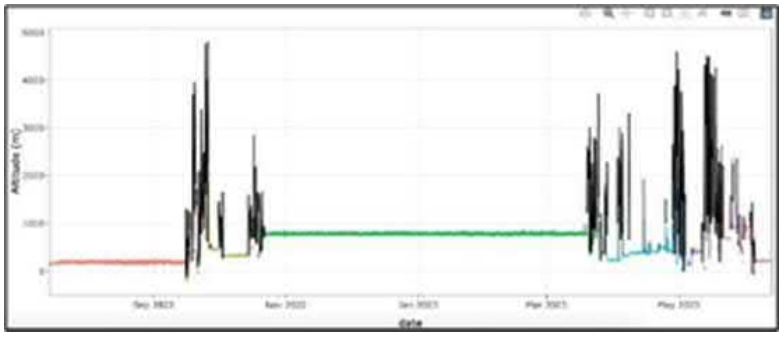
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Engoulevent d'Europe Caprimulgus europaeus***

Déploiement en 2022 sur 11 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais en élastique (fil pour collier de perles), leg loop de longueur totale 120 mm, qui est prévu pour s'ajuster à la morphologie et aux variations de la corpulence (prise de gras), et céder dans le temps. Masse des oiseaux équipés : 61,5-82,6g (moyenne de 66,8g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,74g, nous étions à 1,2% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle de 26 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical, en ciblant les postes de chant avec repasse ou les points d'eau (rivière et mare). Recaptures réalisées entre mai et septembre 2023 et 2024, de 2 individus équipés en bonne santé sans aucune lésion, soit un taux de 18% de récupération de GLS, et 4% sur le groupe témoin. Pas de redéploiement en 2023. A noter que le terrain 2024 a permis la recapture d'un individu équipé en 2022. Les deux GLS ont fonctionné, avec un exemple ci-dessous.







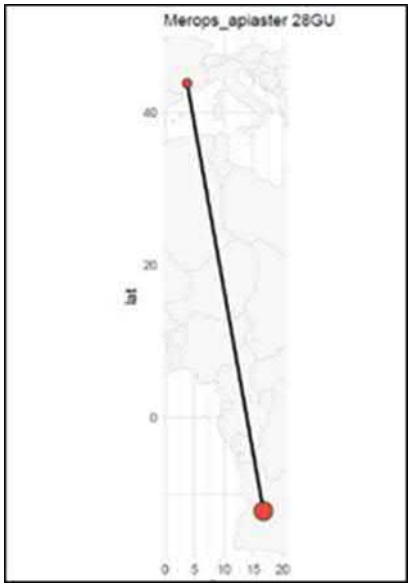
-

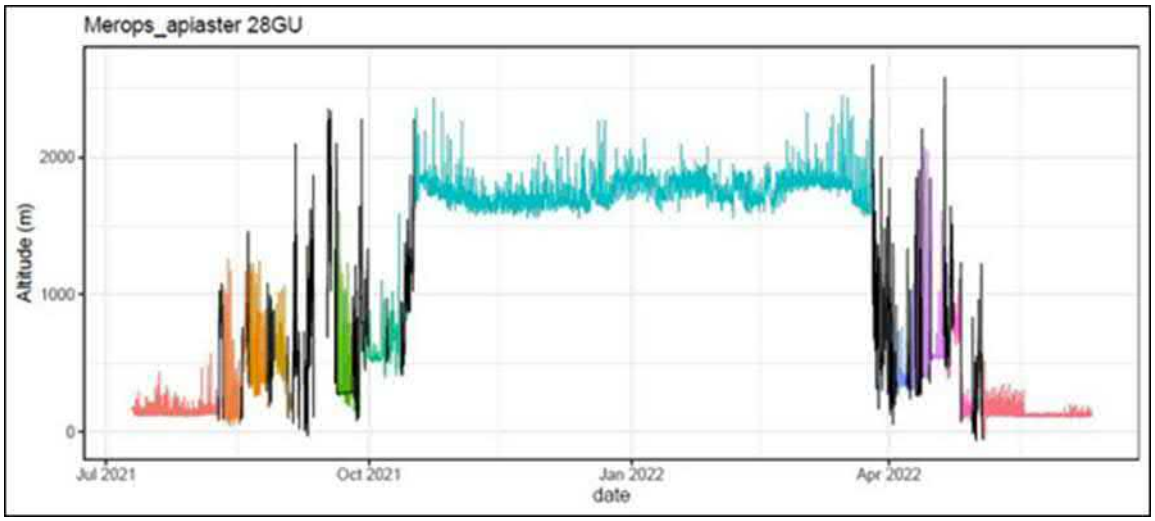
- ***Guêpier d'Europe Merops apiaster***

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Déploiement en 2021 et 2022 sur 27 individus entre juin et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,2g en 2021 et 0,49g en 2022, harnais cordelette fixe ou ajustable, en leg loop. Masse des individus équipés : 46,3-62,4g (moyenne de 52,1g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,3g en 2021 et 0,62g en 2022, nous étions à moins de 3% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle de 59 individus. Captures réalisées en période de reproduction sur les colonies ou à proximité : au filet vertical monofilament, au clapnet poteau, et au clapnet à l'entrée des terriers. Dans le cas des captures au nid, seuls les couples en nourrissage de poussins de plus de 15 jours ont été ciblés, avec opération de capture n'excédant pas 30 minutes par terrier ou colonie dense. Recaptures réalisées entre juin et août en 2022 et 2023, de 4 individus équipés, soit un taux de 15% de récupération de GLS, et seulement 1,7% sur le groupe témoin (individu retrouvé prédaté récemment à proximité de son terrier de reproduction de l'année précédente). Aucune lésion observée au retrait du GLS. Pas de redéploiement en 2023. Les GLS ont tous fonctionné, un exemple ci-dessous.







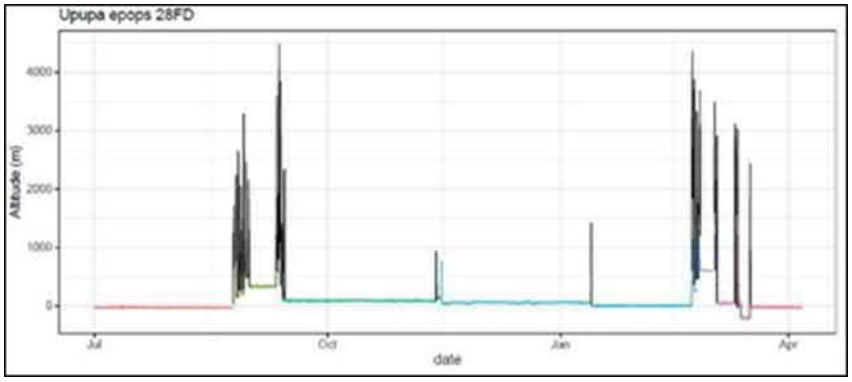
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Huppe fasciée Upupa epops***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 21 individus entre juin et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,4g en 2021/2022 et 0,49g en 2022, harnais élastique et cordelette ajustable, leg loop. Masse des individus équipés : 57,3,3-74,3g (moyenne de 67g). Avec une masse totale de l'équipement (bagues+harnais+GLS) de 1,75g en 2021/2022 et 0,64g en 2022, nous étions à moins de 3% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs (01 etc.). Individus équipés avec couleur à droite. Groupe contrôle de 20 individus, avec couleur à gauche. Captures réalisées en période de reproduction : au filet vertical ou horizontal, avec utilisation de repasse et de forme. Dans le cas des captures au nid, seuls les couples en nourrissage de poussins de plus de 15 jours ont été ciblés, avec opération de capture n'excédant pas 30 minutes par cavité. Recaptures réalisées entre mars et juillet en 2022 et 2023 : 4 individus avec leur GLS recapturés ; 2 individus recapturés ayant perdus leur GLS ; et 1 individu revu sans être capturé. Soit un taux de 19% de récupération de GLS et 33% de retour d'oiseaux équipés. Légère abrasion sur le dos observée au retrait du GLS pour 2 individus. Pour le lot contrôle, 2 individus retrouvés soit 10% de retour (1 individu vu et 1 individu recapturé). Les 4 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.



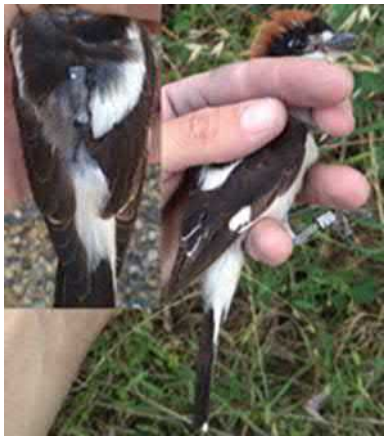


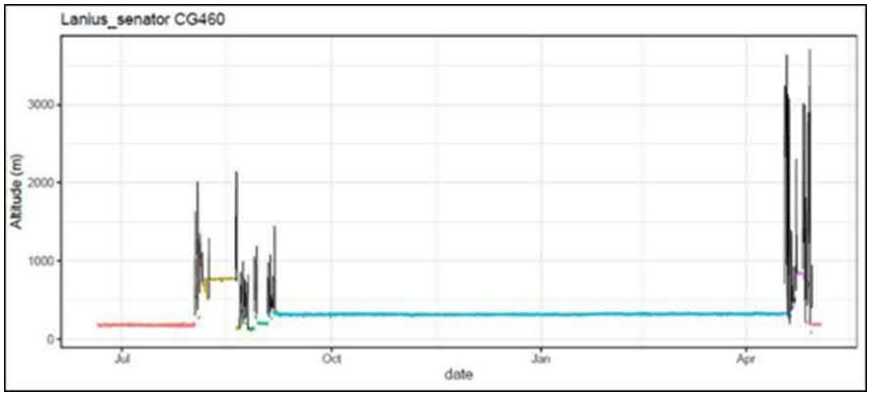


Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Pie-grièche à tête rousse Lanius senator***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 21 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,2g en 2021 et 0,49g en 2022, harnais cordelette ajustable en leg loop. Masse des individus équipés : 29,6-34,5g (moyenne de 32,4g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,42g en 2021 et 0,71g en 2022, nous étions à moins de 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic blanche avec code à d'une lettre et 2 chiffres (A23 à A67). Individus équipés avec couleur à droite. Groupe contrôle de 21 individus, avec couleur à gauche. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical avec utilisation de repasse et de forme, en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et juillet en 2022 et 2023 : 3 individus avec leur GLS recapturé et 1 individu revu non recapturé, soit un taux de 14% de récupération de GLS et 19% de retour d'oiseaux équipés. Légère abrasion sur le dos observée au retrait du GLS sur 1 individu et 1 GLS presque entièrement détruit par l'oiseau. Pour le lot contrôle, 7 individus retrouvés soit 33% de retour. Les 3 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.





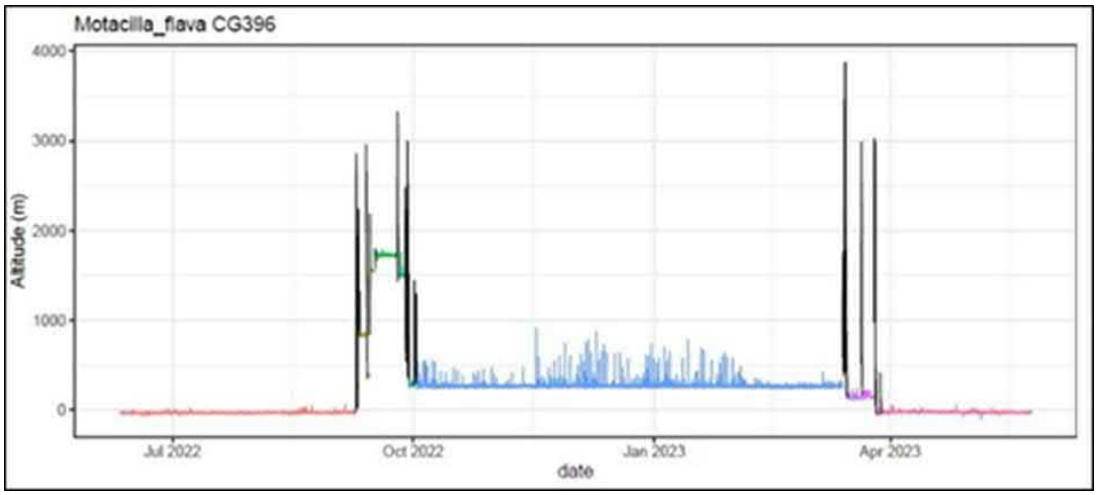
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Bergeronnette printanière Motacilla flava***

Déploiement en 2022 et 2023 sur 20 individus entre avril et juin. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) leg loop. Masse des individus équipés 15,4-19,1g (moyenne de 16,5g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,66g, nous étions à moins de 4.2% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, de 01 à 36. Groupe contrôle de 16 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament, avec utilisation de repasse. En itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre mars et juin 2023 et 2024, de 6 individus équipés de GLS et 2 individus revus mais non capturés, soit un taux de 40% de retour. Aucune abrasion constatée au retrait du GLS. Pour le lot contrôle, 8 individus retrouvés soit 53% de retour. Les 6 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.







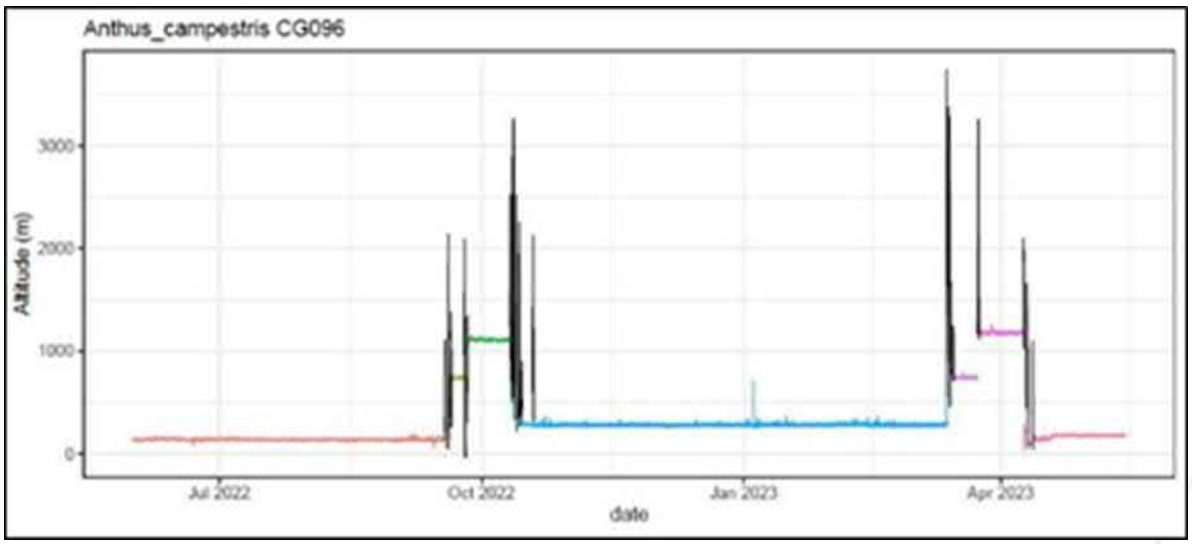
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Pipit rousseline Anthus campestris***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 21 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,2g en 2021 et 0,49g en 2022, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 24,3-30,6g (moyenne de 26,4g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,37g en 2021 et 0,66g en 2022, nous étions à moins de 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, de 01 à 40. Individus équipés avec couleur à droite. Groupe contrôle de 19 individus, avec couleur à gauche. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament avec utilisation de repasse, en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et juillet en 2022 et 2023 : 5 individus avec leur GLS recapturés, soit un taux de 23% de récupération. Aucune abrasion constatée au retrait du GLS. Pour le lot contrôle, 4 individus retrouvés soit 21% de retour. Les 5 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.





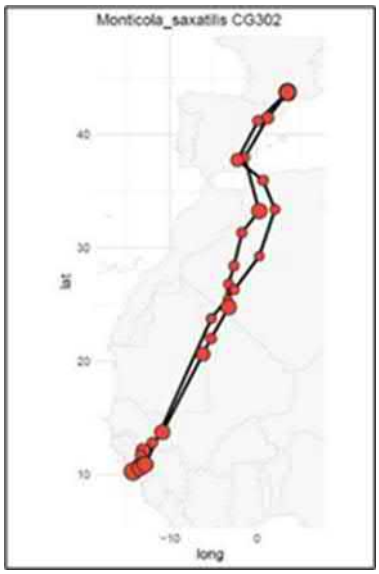


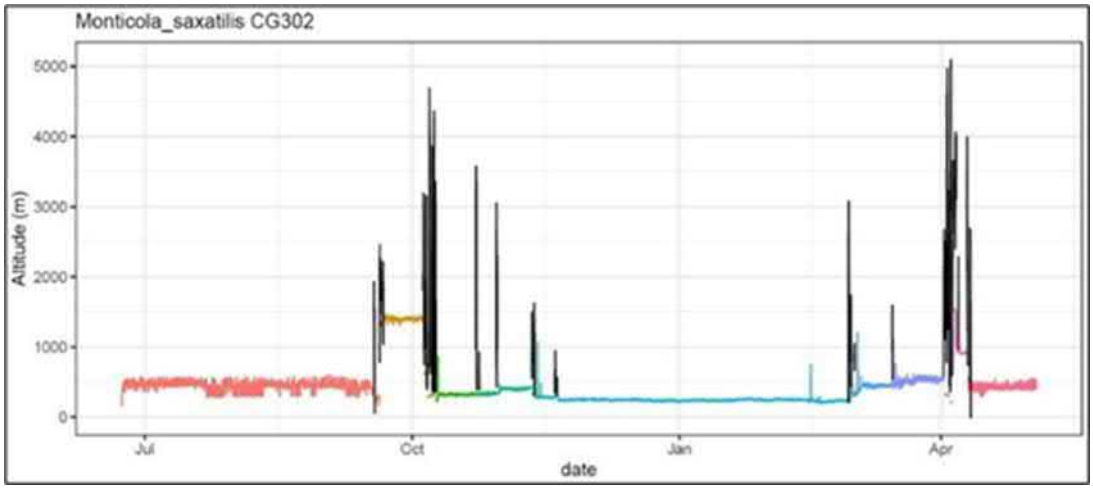
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Monticole de roche Monticola saxatilis***

Déploiement en 2022 sur 3 individus entre mai et juin. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 51,2-54,9g (moyenne de 52,5g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,74g, nous étions à moins de 2% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, de 01 à 03. Aucun groupe contrôle au regard de l'effectif réduit. Recaptures réalisées en mai 2023 d'1 individu avec son GLS, soit un taux de 33% de récupération. Le GLS a fonctionné.



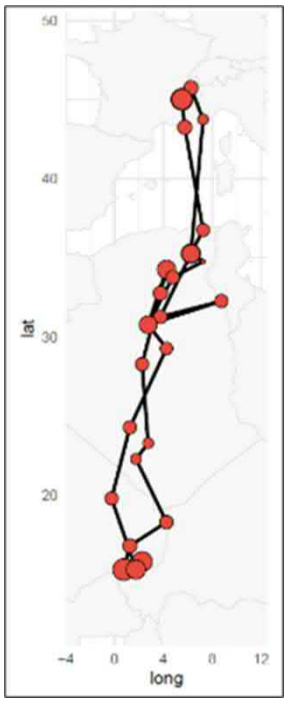


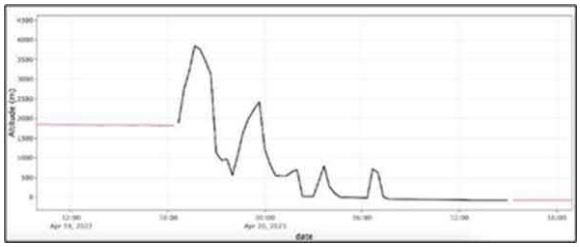


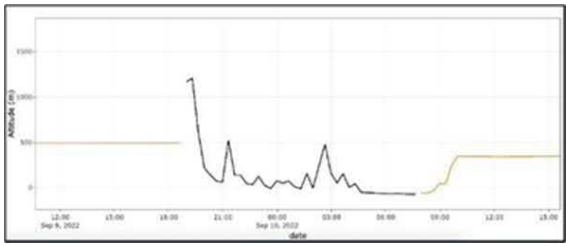
- ***Traquet motteux Oenanthe oenanthe***

Déploiement en 2022 sur 15 individus entre mai et juin. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle), leg loop. Masse des individus équipés : 22,2-28,6g (moyenne de 24,8g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,66g, nous étions à moins de 3% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, de 01 à 30. Groupe contrôle de 15 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament, clapnet et matoles, avec utilisation de repasse et de forme. Recaptures réalisées entre mai et juillet 2023 de 4 individus équipés de GLS dont 1 ayant perdu son GLS, soit un taux de 26% de retour. Pour le lot contrôle, 6 individus retrouvés soit 40% de retour. Les 3 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.







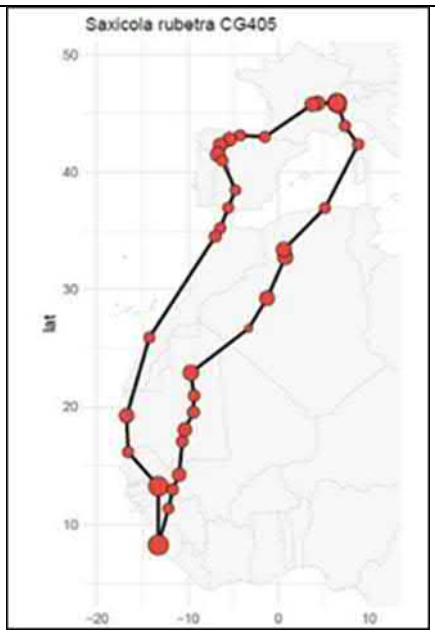


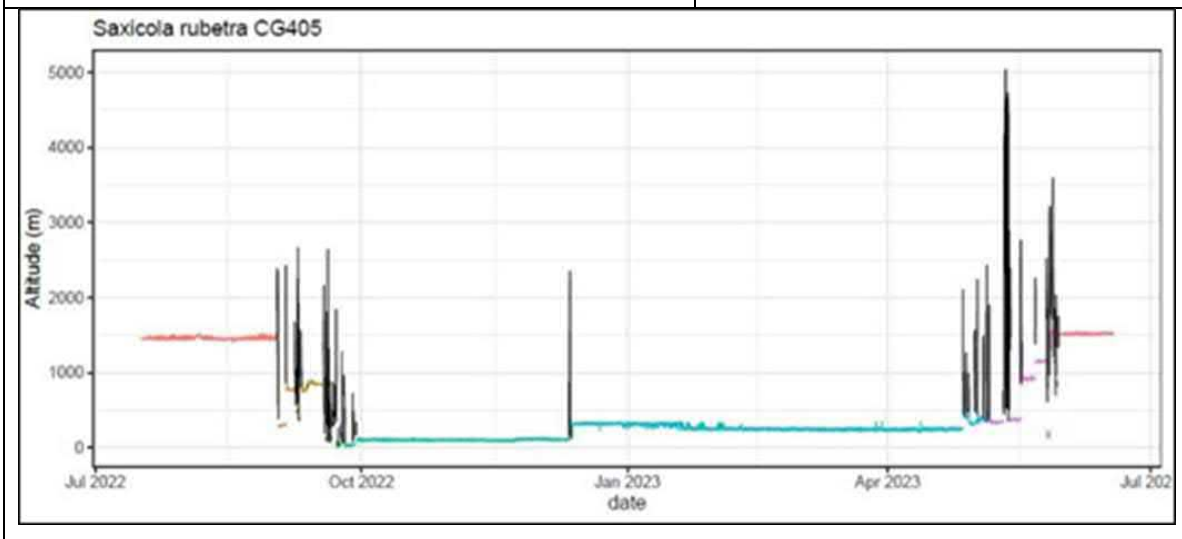
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Tarier des prés Saxicola rubetra***

Déploiement en 2022 et 2023 sur 23 individus en juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 14,6-21g (moyenne de 16,5g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,66g, nous étions à moins de 4.5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, 01 à 40. Groupe contrôle de 13 individus bagués couleur. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament et clapnet, avec utilisation de repasse. Recaptures entre juin et juillet 2023 et 2024, de 7 individus équipés de GLS, soit un taux de 30% de retour. Pour le lot contrôle, 3 individus retrouvés soit 23% de retour. Les 7 GLS ont fonctionné, avec un exemple ci-dessous.







- ***Rougequeue à front blanc Phoenichurus phoenicurus***

Déploiement en 2022 et 2023 sur 20 individus entre mai et juin. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 12,1-14,9g (moyenne de 13,1g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,66g, nous étions à 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs, de 01 à 40. Groupe contrôle de 17 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical avec utilisation de repasse. En itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et juin 2023 et 2024, de 4 individus équipés de GLS, soit un taux de récupération de 20%. Aucune abrasion constatée au retrait du GLS. Pour le lot contrôle, 8 individus retrouvés soit 47% de retour. Les 4 GLS ont fonctionné, avec un exemple ci-dessous.



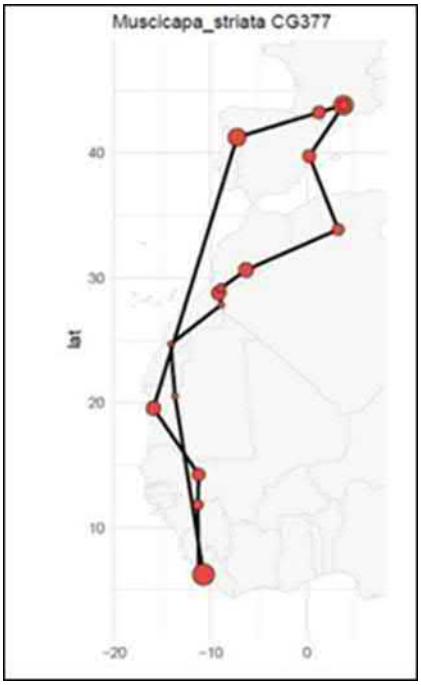


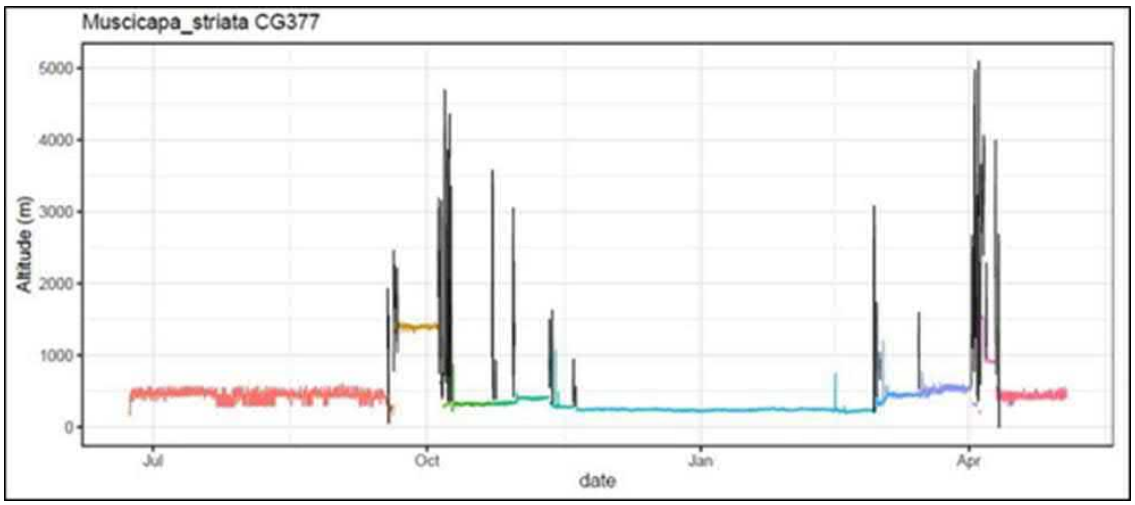
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Gobemouche gris Muscicapa striata***

Déploiement en 2022 sur 10 individus entre mai et juin. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 13-17,4g (moyenne de 15,4g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,6g, nous étions à moins de 4,6% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et aucun groupe contrôle. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical superposé, en ciblant les postes de chant, zones d'alimentation et proximité des nids. Souvent en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et juin 2023 et 2024, de 5 individus équipés et 1 individu équipé d'un GLS mais non recapturé, soit un taux de 60% de retour. Aucune abrasion constatée au retrait du GLS. Les 5 GLS ont fonctionné, avec un exemple ci-dessous.







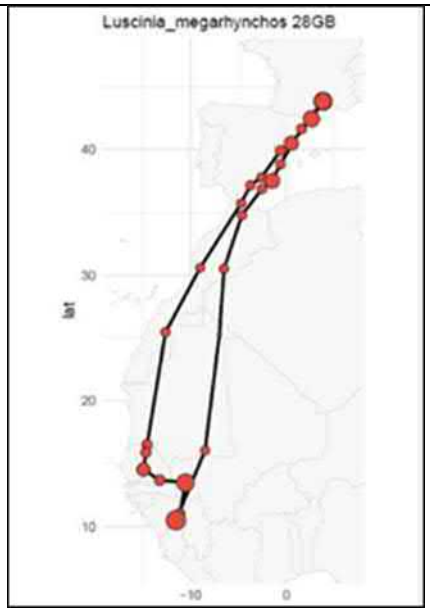
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

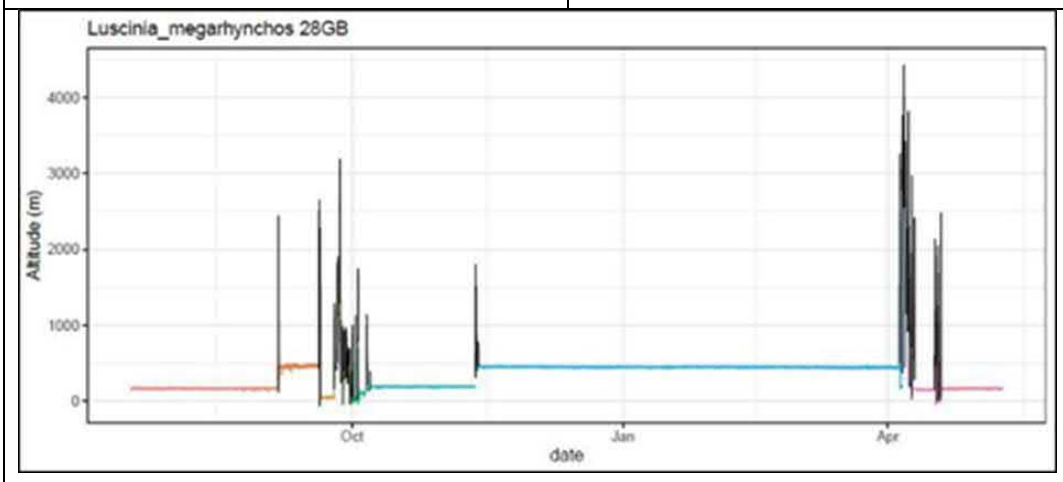
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Rossignol philomèle Luscinia megarhynchos***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 21 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,2g en 2021 et 0,49g en 2022, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 17,9-23,1g (moyenne de 20,9g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,31 en 2021 et 0,6g en 2022, nous étions au plus à 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle de 47 individus seulement bagués. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical, en ciblant les postes de chant avec ou sans repasse. Souvent en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et août de 3 individus équipés, soit un taux de 14% de récupération de GLS, et 23% de recaptures sur le groupe témoin. Les 3 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.







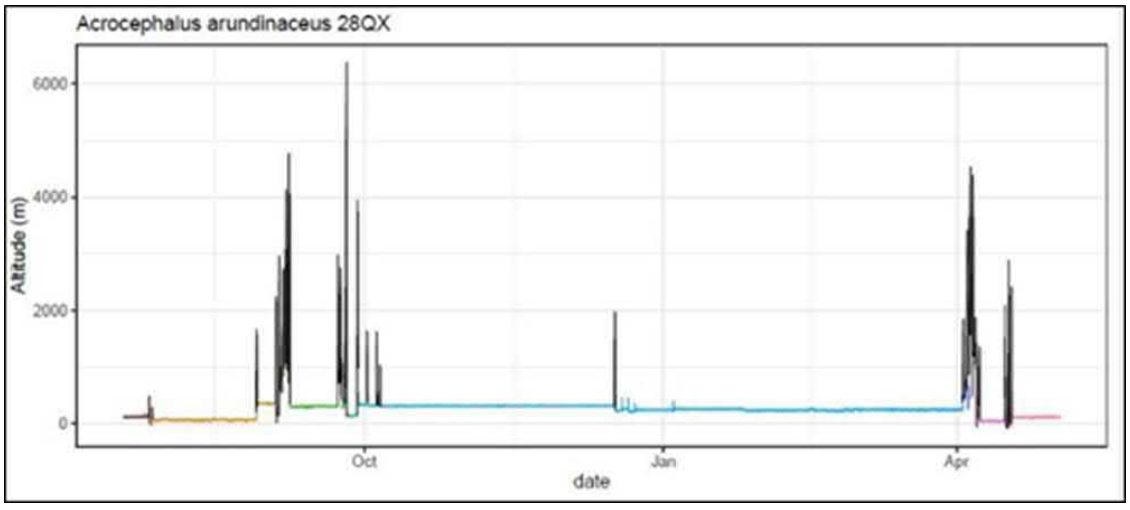
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Rousserolle turdoïde Acrocephalus arundinaceus***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 25 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,3g en 2021/2022 et 0,49g en 2022, harnais cordelette ajustable, leg loop. Masse des individus équipés : 26,4-34,9g (moyenne de 31,2g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,52g en 2021/2022 et 0,71g en 2022, nous étions à moins de 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Baguage coloré Darvic rouge avec code à deux chiffres blancs (à partir de 01). Individus équipés avec couleur à droite. Groupe contrôle de 38 individus, avec couleur à gauche. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical avec utilisation de repasse, en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre mai et juillet en 2022 et 2023, de 2 individus avec leur GLS, soit un taux de 8% de récupération de GLS. Pour le lot contrôle, 5 individus retrouvés soit 13% de retour. Les 2 GLS ont fonctionné, un exemple ci-dessous.







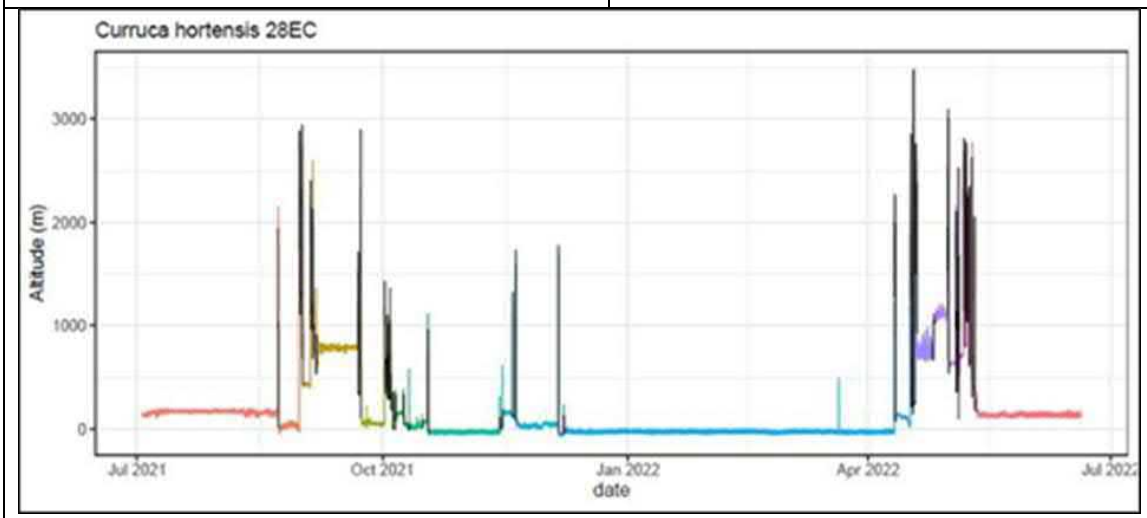
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Fauvette orphée Sylvia hortensis***

Déploiement en 2021 et 2022 sur 25 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 1,2g en 2021 et 0,49g en 2022, harnais élastique (fil de collier de perle), en leg loop. Masse des individus équipés : 18,2-23,3 g (moyenne 21g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 1,31 en 2021 et 0,6g en 2022, nous étions au plus à 5% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle de 28 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical, en ciblant les postes de chant avec ou sans repasse. Souvent en itinérant durant moins d'1h par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et juillet de 6 individus équipés, soit un taux de 24% de récupération de GLS, et 21% de recapture sur le groupe témoin. Légère lésion observée sur le dos au retrait du GLS de 2021, mais individu recapturé en 2023 sans aucune lésion. Les 6 GLS ont fonctionné. Un article a été publié avec les données de migration : Jiguet F, Champagnon J, Duriez O, de Franceschi C, Tillo S, Dufour P (2025) Crossing the Sahara by small jumps: the return migration of the Western Orphean Warbler Curruca hortensis. Journal of Ornithology. doi: 10.1007/s10336-025-02258-4





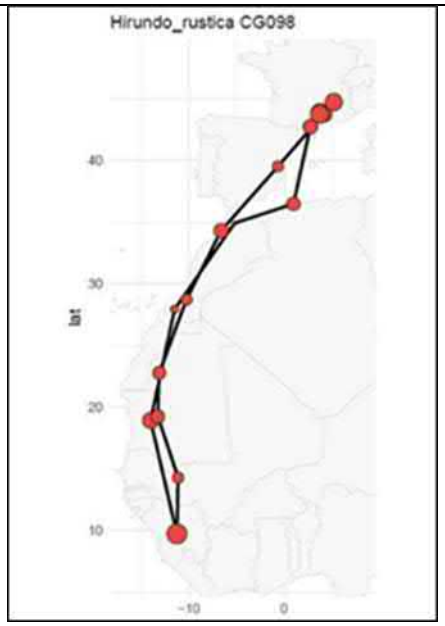


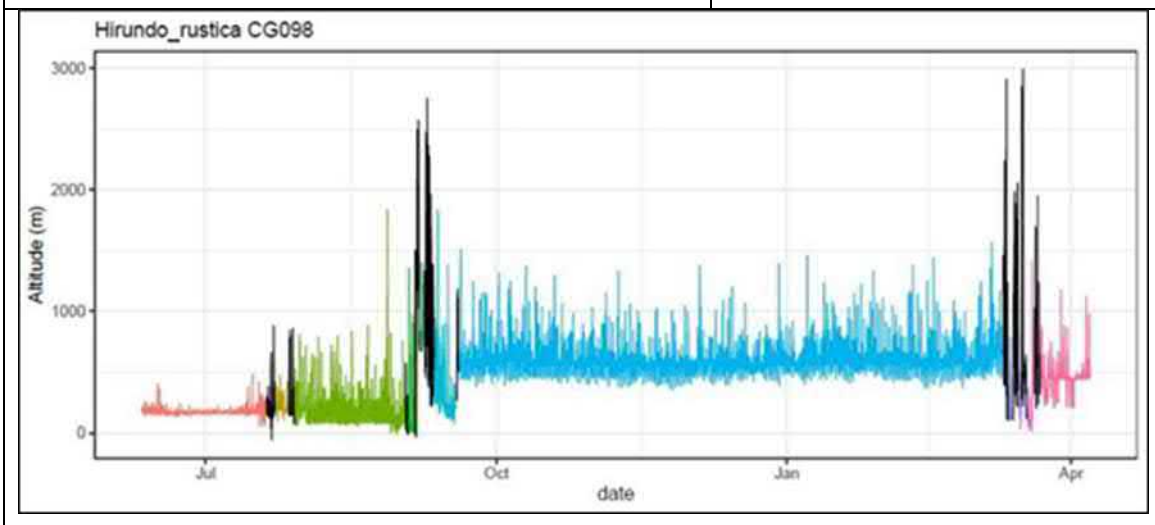
Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

- ***Hirondelle rustique Hirundo rustica***

Déploiement en 2022 sur 16 individus entre mai et juillet. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 16,1-20,2g (moyenne de 17,9g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,6g, nous étions à moins de 3,7% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle métal de 20 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament, en ciblant les nids isolés ou colonies avec poussins de plus de 5 jours. Recaptures réalisées entre mars et juin de 5 individus équipés et 2 individus ayant perdus leur GLS, soit un taux de 44% de retour. Pour le lot contrôle, 8 individus recapturés soit 40% de retour. Les 5 GLS ont fonctionné, avec un exemple ci-dessous.







s daurica



Déploiement en 2022 sur 12 individus entre juin et août. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 19,1-26,4g (moyenne de 21,2g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,6g, nous étions à de 3,1% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et un groupe contrôle métal de 12 individus. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament, en ciblant les nids avec poussins de plus de 5 jours. En itinérant durant moins d'1h15 par point de capture. Recaptures réalisées entre avril et août de 3 individus ayant perdus leur GLS, soit un taux de 25% de retour. Pour le lot contrôle, 4 individus recapturés soit 33% de retour. Pas de redéploiement en 2023 au regard de l'absence de récupération de GLS.

- ***Hirondelle de fenêtre Delichon urbicum***



D 2023 sur 10 individus. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier d . Masse des individus équipés : 16,1-18,9g (moyenne de 17,6g). Avec une masse totale de l' +harnais+GLS) de 0,6g, nous étions à moins de 3,7% de la masse de l'oiseau le plus léger. P leur, et pas de groupe contrôle. Captures réalisées en période de reproduction sur une c vertical monofilament devant les nids avec poussins de plus de 5 jours. Une recherche v s fructueuse en 2024, avec 3 individus bagués métal à gauche repérés, permettant ainsi la r es individus. 2 individus avaient encore leur GLS et 1 individu l'avait perdu, soit un taux de r GLS ont fonctionné.

rbres Anthus trivialis



Déploiement en juillet 2023 sur 7 individus. Géolocalisateur multi-capteurs 0,49g, harnais élastique (fil de collier de perle) en leg loop. Masse des individus équipés : 20,3-24,9g (moyenne de 22,3g). Avec une masse totale de l'équipement (bague+harnais+GLS) de 0,6g, nous étions à moins de 2,9% de la masse de l'oiseau le plus léger. Pas de baguage couleur, et pas de groupe contrôle. Captures réalisées en période de reproduction au filet vertical monofilament et matoles, en ciblant les postes de chant. Une recherche des individus a été infructueuse en 2024. Aucun résultat pour cette espèce.

- **Annexe 4 : Rapport de Léo Denoual**

MASTER 2 BEE DYNAMO ANNÉE 2023-2024

DYNAMIQUE ET MODÉLISATION DE LA BIODIVERSITÉ

DENOUAL LÉO



Influence of weather conditions on ecological barrier crossing by migratory birds: the case of the Mediterranean Sea.

STRUCTURE D'ACCUEIL :

Responsables de Stage : **Dufour Paul**, Post-doctorant, CEFE – Tour du Valat

Duriez Olivier, Maître de conférences, CEFE

Champagnon Jocelyn, Ingénieur de recherche, Tour du Valat

Stage du **15 janvier** au **12 juillet 2024**, soutenance orale le **20 juin 2024**

François Munoz - *Responsable du Master BEE DynaMO*

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Abstract

Influence of weather conditions on ecological barrier crossing by migratory birds: the case of the Mediterranean Sea.

Migratory bird species facing ecological barriers adjusted their migration timing and developed flight strategies to minimize risks. This study is among the first to examine the determinants of migration departure and associated crossing strategies using telemetry data from 15 species, enhancing the robustness of the results. The probability of individual departure was affected by four key weather factors: atmospheric pressure, temperature, rainfall and wind direction. These findings confirm previous research and suggest that the influence of weather on departure decisions is consistent across various ecological groups. Additionally, impact of weather conditions on flight strategy choice used to cross the Mediterranean Sea was investigated after strategies identification. While some particular weather conditions influenced the choice of a given strategy, species migratory habits also appeared to play a crucial role, highlighting the need for further investigations. This study advances our understanding of how migratory birds cope with ecological barriers and underscores the importance of weather adaptation in their migration strategies.

Keywords: Flight strategies, Migration timing, Movement ecology, species-specific behaviour, weather influence

Résumé

Influence des conditions météorologiques sur la traversée d'une barrière écologique par les oiseaux migrateurs, cas de la Mer Méditerranée.

Les espèces d'oiseaux migrateurs ajustent la temporalité de leur migration et ont développé des stratégies de vol afin de minimiser les risques face aux barrières écologiques. Cette étude examine les déterminants du départ migratoire et des stratégies de traversée, en utilisant des données télémétriques de 15 espèces, renforçant ainsi la robustesse des résultats. La probabilité de départ est influencée par quatre facteurs météorologiques : pression atmosphérique, température, précipitations et direction du vent, confirmant leur impact similaire sur les décisions de départ d'espèces appartenant à des groupes écologiques différents. L'impact des conditions météorologiques sur le choix des stratégies de vol pour traverser la Méditerranée a également été étudié. Certaines conditions influencent le choix d'une stratégie. Toutefois, les habitudes migratoires des espèces semblent jouer un rôle crucial, soulignant la nécessité de recherches supplémentaires. Cette étude enrichit notre compréhension des stratégies de migration des oiseaux face aux barrières écologiques et souligne leurs adaptations aux conditions météorologiques.

Mots-clés : Conditions météorologiques, Écologie du mouvement, Espèces migratrices, Stratégies de vol, Temporalité de la migration

Remerciements

Ce rapport présente le travail que j'ai réalisé durant mon stage au CEFE. Bien que ce dernier ne soit pas encore terminé à l'heure où j'écris ces lignes, j'en profite pour remercier dès à présent les personnes suivantes, qui m'ont apporté une aide précieuse au cours de ces derniers mois concernant le sujet de stage :

Mes encadrants de stage : Paul Dufour et Olivier Duriez au CEFE, ainsi que Jocelyn Champagnon à la Tour du Valat, pour leur accompagnement durant toutes les étapes ayant conduit à la réalisation du présent rapport : mise à disposition des données, aide à la définition des objectifs de l'étude, conseils sur les analyses statistiques les plus appropriées vis-à-vis du sujet d'étude et également pour les nombreuses corrections lors de la rédaction de ce rapport (mention spéciale à Olivier pour sa très grande disponibilité durant ces derniers jours !).

J'en profite également pour remercier certaines personnes qui à travers nos échanges m'ont permis de résoudre certains questionnements rencontrés au cours de l'analyse des données : Elie Gaget (Tour du Valat) et Nicolas Courbin (CEFE).

Merci également à Frédéric Jiguet (MNHN) pour sa disponibilité en début de stage ayant permis de définir les grands axes de celui-ci et de proposer des pistes de réflexion supplémentaires.

En dehors de mon sujet de stage, je remercie à nouveau Olivier pour m'avoir proposé de l'accompagner à plusieurs occasions sur le terrain, afin de participer au suivi de la nidification des vautours fauves et également lors de sessions du programme de baguage STOC-Capture.

Enfin, merci à tous les nombreux collègues ornithos du CEFE, auprès desquels j'ai beaucoup progressé ces derniers mois, et découvert de très nombreuses espèces du « Sud » que je n'avais jamais eu l'opportunité d'observer précédemment.

Montpellier, vendredi 14 juin 2024

Introduction

Seasonal migration is defined as a change of occupied habitat by animals, recurring twice a year and alternating in direction, which tends to secure optimum environmental conditions at all times (Winger *et al*., 2019). Birds undertake some of the most spectacular annual migrations in the animal kingdom and migrate from places with few or decreasing resources (*e.g*. food availability) to areas where resources are increasing or easily accessible. Hence, this behaviour allows individuals to benefit from a constant resources availability, necessary to achieve successive stages of their life cycle, in which some are particularly energy demanding (*e.g*. breeding). This costly seasonal movement of migration engages billions of individuals, with migration distances and routes differing for species.

Some of these migration routes cover very long distances potentially involving unfavourable environments crossing. For migratory birds, such environments constitute ecological barriers, synonyms of potential difficulties while crossing (Newton, 2023). Ecological barriers mean a lower or more heterogeneous availability of food resources, harsh weather conditions (*e.g.* deserts), flight altitude constraints (*e.g*. mountain ranges), or an impossibility to make stopovers to rest or fuel, then involving highly demanding non-stop flights (*e.g*. large marine areas). These constraints result in higher mortality risks, especially when experienced weather conditions are inclement, as these conditions are strongly affecting energy costs of migratory flights (Lok *et al*., 2015). For all these reasons, migratory species facing ecological barriers developed flight strategies and adjusted their migration timing in order to minimize risks.

Several recent studies investigated how migrant birds cope with ecological barriers during their migration journey, generally focusing on one species in a particular geographical context (Gill *et al*., 2014) or on few species with similar ecology (Cooper *et al*., 2023). First, individuals can reduce mortality risks by adapting their routes to avoid crossing the barriers, even if travel distance is increased and consequently energy cost (Alerstam, 2001). Secondly, some species evolved migration routes by developing the ability to cross large barriers using direct flights. As an example, some species crossing large desert areas can change their flight altitude to avoid physiological consequences like overheating (*e.g*. Great reed Warblers (*Acrocephalus arundinaceus*): Sjöberg *et al*., 2021). Similarly shorebirds from North America were able to cross the entire Atlantic Ocean to winter in southern Europe or Africa (Léandri-Breton *et al*., 2019). When crossing such large marine barriers, birds have two options: a) following the coast, allowing them to stop if necessary (*e.g*. in case of adverse weather conditions) or b)

performing a direct, straight crossing. Yet the choice between these two "options" is highly affected by environmental conditions experienced during their migratory journey (Senner *et al*., 2018) but several questions remain regarding the variety of strategies for crossing barriers, the differences of strategies (*e.g*. altitudes and routes) that can exist between (and within) migratory species and the weather conditions that influence the choice of certain strategies.

The influence of weather conditions on seasonal migration of birds have been extensively studied (Shamoun-Baranes *et al*., 2017). Sjöberg *et al*. (2015) showed that departure decision was affected by wind conditions on the previous days in passerines migrating across the Baltic Sea. Decision of departure can be flexibly adjusted, notably using increase in atmospheric pressure as cue (Cooper *et al*., 2023). Such rise in pressure is commonly linked to warm temperatures, clear skies (*i.e*. indicative of the use of celestial cues for orientation), and calm winds in the preceding days, collectively serving as an indicator for a safe initiation of flight. Conversely, in suboptimal conditions migrants can generally postpone their departures.

However, migration is a complex phenomenon, with high inter- and intra-specific variability in the respective strategies. Effects of weather conditions, on night-to-night departure decisions, might differ between species (*e.g.* departure decisions in long-distance migrant species seem to be less affected by wind conditions than in median-distance migrants: Packmor *et al*., 2020). In addition, delaying departure to wait for optimal wind conditions might not be adaptative if individuals are under strong time constraints related to their annual cycle (*e.g*. see McLaren *et al*., 2012). Since most of these studies have focused on a single or few species, it is not yet known whether these results apply to many species. For example, it is unclear whether, faced with the same ecological barrier, several species of migratory birds will wait for similar weather conditions before crossing.

In the present study, I focused on migratory birds crossing the marine part of the Gulf of Lion and the Mediterranean Sea, representing a large marine barrier for migratory birds in Western Europe. I used telemetry data, *i.e*., GPS tracking data with 3D precise locations, of 121 sea-crossing flights during post-breeding migration from 15 migratory species (shorebirds, raptors, waterbirds, landbirds) breeding or making stopovers in the surrounding regions (**Figure** 1A). I first investigated the crossing strategies in terms of phenology (**Figure** 1B), trajectory (**Figure** 1C), and altitude dynamics (**Figure** 1D). Then, I tested the relationships between at sea migration departure and weather conditions experienced by individuals before migration. I hypothesized that weather conditions have larger influence on bird

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

departure decision during the last days before the departure event (*e.g.* see Cooper *et al.*, 2023). More specifically, I hypothesized that increasing atmospheric pressure and temperature could be linked with a higher probability of departure, as for supportive winds and clear skies. Conversely, heavy rain, overcast sky and strong head wind were expected to decrease departure probability (Morganti *et al.*, 2011; Sjöberg *et al.*, 2015; Cooper *et al.*, 2023).

Finally, I tested the relationship between weather conditions experienced by individuals before departure and their choice of strategies for crossing the sea. To do so, I performed a classification of sea crossing flights in several groups prior of the statistical analysis to define possible different strategies. I expected to highlight different strategies, maybe related between species or group of species with the same ecology. I also expected that particular weather conditions could explain the choice of a strategy: long direct flights at high altitudes across the sea might be linked with supportive wind conditions as their duration – and energy cost – is higher than shorter flights, less energy demanding. By contrast, short flights or flights along the Iberian Peninsula coast might probably be related to adverse weather conditions.

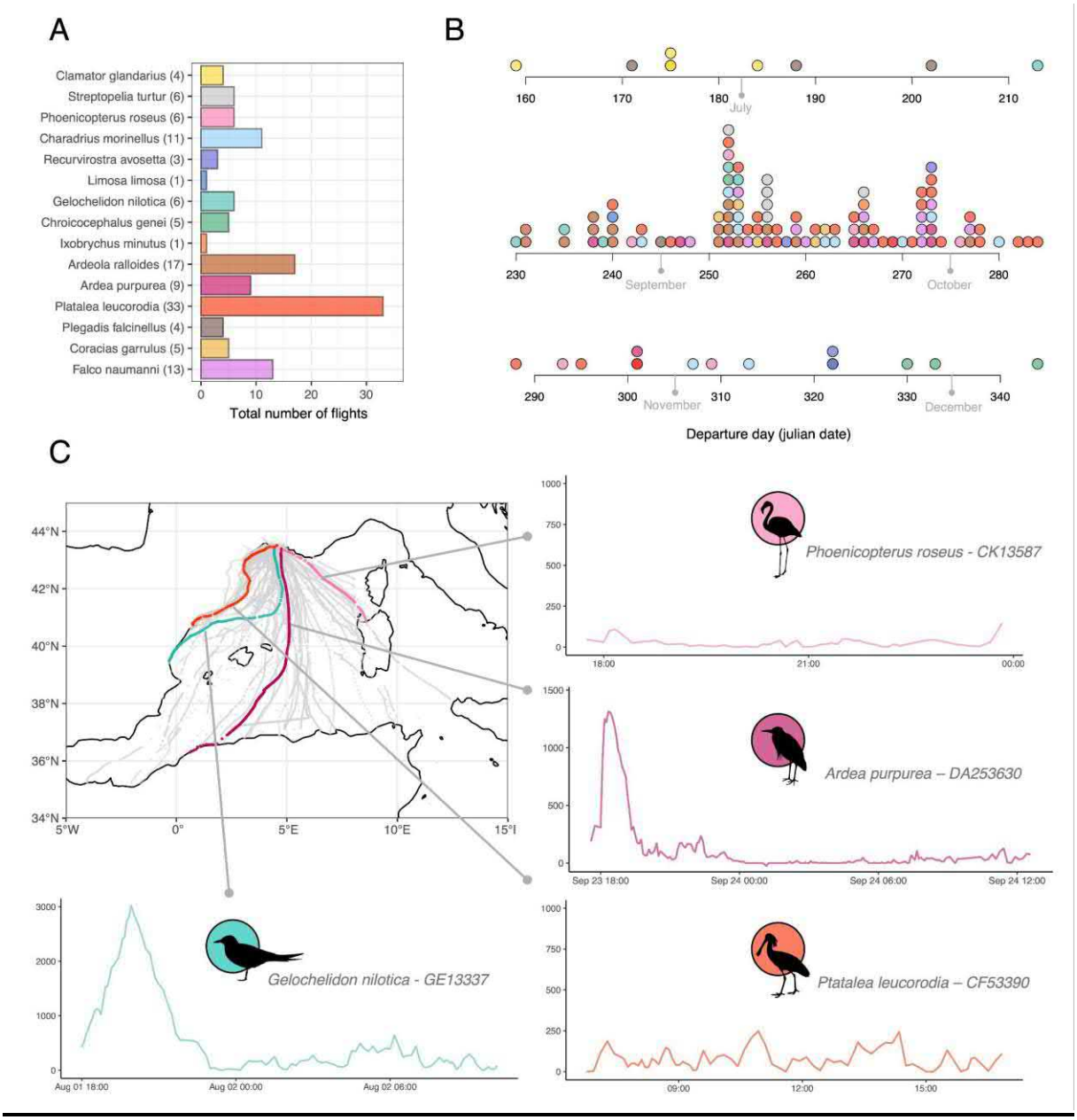


Figure 1. Description of data used in the present study. **A**. Repartition between species (n = 15) of migratory flights departing from terrestrial part of the Gulf of Lion and crossing the Mediterranean Sea (n = 121). **B**. Phenology of post-breeding migration for all the individuals included in the study (n = 118). Departure date is given as calendar date, from the first day of January. **C**. Examples of flight tracks of birds from differents species when crossing the Mediterranean Sea, and associated altitude profiles. Altitude profiles represent the variation of flight altitude (in meters above the sea level) during the entire duration of the sea crossing. Silhouettes reproduced from PhyloPic (http://phylopic.org/) under a Creative Commons license.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Methods

Species and study sites

This study is part of the 'Migralion' project, which aims to characterize the use of the marine part of the Gulf of Lion (a geographical region of Mediterranean Sea) by migratory terrestrial birds. In this study, we tracked 15 species from four distinct ecological groups (**Table 1**) which are mostly species breeding in the surrounding counties (Aude, Hérault, Gard, Bouches-du-Rhône, Var), with the exception of two shorebirds species: Eurasian Dotterel (*Charadrius morinellus*; n = 11 individuals) and Black-tailed Godwit (*Limosa limosa*; n=1) which are breeding in northern Europe and only use this area as migratory stopovers. For breeding species, individuals were caught and tagged at or near their breeding sites. Most of the birds caught for this study were adults, but we added data of 36% of individuals as juveniles (*i.e.* inexperienced birds that have never made migratory flights).

Table 1. Species included in this study. The number of individuals concerns individuals which have realised at least one post-breeding migratory flight over the Mediterranean Sea (see column "Sea flights" for numbers of flights per species conserved in the analysis). More details are available in the "*Data preparation*" part.

Ecological group	Species	Family	Individuals	Sea flights
Shorebirds	Eurasian Dotterel (*Charadrius morinellus*)	Charadriidae	11	11
	Black-tailed Godwit (*Limosa limosa*)	Scolopacidae	1	1
	Pied Avocet (*Recurvirostra avosetta*)	Recurvirostridae	3	3
Raptors	Lesser Kestrel (*Falco naumanni*)	Falconidae	12	12
Waterbirds	Purple Heron (*Ardea purpurea*)	Ardeidae	9	9
	Squacco Heron (*Ardeola ralloides*)	Ardeidae	17	17
	Little Bittern (*Ixobrychus minutus*)	Ardeidae	1	1
	Slender-billed Gull (*Chroicocephalus genei*)	Laridae	4	5
	Gull-billed Tern (*Gelochelidon nilotica*)	Laridae	6	6
	Greater Flamingo (*Phoenicopterus roseus*)	Phoenicopteridae	6	6
	Eurasian Spoonbill (*Platalea leucorodia*)	Threskiornithidae	31	33
	Glossy Ibis (*Plegadis falcinellus*)	Threskiornithidae	4	4
Landbirds	Great spotted Cuckoo (*Clamator glandarius*)	Cuculidae	4	4
	European Roller (*Coracias garrulus*)	Coraciidae	3	3
	Turtle Dove (*Streptopelia turtur*)	Columbidae	6	6

Tagging and telemetry data

Using capture methods (*e.g.*, mist nets, spring traps, cages), adapted to each species, a total of 324 birds were captured between 2020 and 2023 by experienced qualified ringers. Captured individuals were fitted with solar-powered GPS tags (manufactured by Ornitela or Interrex, tag dimensions depending on bird mass, in order not to exceed 3-5% of bird mass). Tags were attached to the birds, using a wing- or leg-loop harness, depending on species morphological characteristics. GPS tags record their own position

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

(longitude, latitude), and elevation (altitude above mean sea level). We defined geofences, *i.e.*, polygons with a given spatial extent, following the limits of the Mediterranean Sea. When a tagged bird enters a geofence, the interval between successive locations was reduced to one location per second during a "high-frequency burst" of 15 to 60 seconds (hereafter called "burst", the duration of each burst depending on the battery of the tag, larger tag with larger batteries allowing longer bursts), followed by a pause of five minutes. Following Schaub *et al*. (2023), we used bursts to reduce the error in measurement of altitude. To prevent an excessive discharge of the battery, bursts were only allowed when battery charge was >25% or >50% (depending on tag mass). Finally, data were transmitted using GSM mobile network (3G or 4G) to an online database, and this operation was executed automatically daily if a good GSM cover was available.

Data preparation

Location and elevation data for each individual were retrieved from the online database and repository Movebank (www.movebank.org). I downloaded all tracking data from this project on Movebank program page corresponding to 324 individuals in total (from the 15 species presented in **Table 1**).

I applied several filters to only consider post-breeding sea-crossing flights (mostly occurring after the breeding period which crossed part of the Mediterranean Sea and departed from the terrestrial part of the Gulf of Lion (*c.a.* from Southern France). Only locations between the beginning of June and the beginning of December were selected. Then, locations corresponding to sea crossing flights were identified in two steps. First, I identified the first location of the migratory flight (*i.e.* defined as the first location after the last stationary area before the migration flight). I defined the stationary area as the area on land where the individual stayed for at least 60 minutes in a radius of < 1 km, which could correspond to a bird feeding zone or resting area. Then, I extracted the date and hour of migration departure. In the second step, I identified locations over the sea by selecting successive points overlapping a shapefile polygon of the Mediterranean Sea. When successive points did not overlap the polygon anymore, the flight over the sea stopped as the bird arrived on land. Finally, when bursts were recorded, I calculated median 3D locations during five minutes period. Sea-crossing flights with less than 10 successive locations were not considered (n = 3).

I visually inspected data with a graphical representation of each flight track and altitude profile to exclude flights incorrectly identified as migratory sea crossing flights. Doing so, I excluded "false departures", for example, flights of birds that have left at sea before returning quickly to their place of departure (n = 3).

After filtering all the tracking data, I retained 121 flights, performed by 15 species. Note that some birds equipped since 2020 had performed several flights and that this sampling contained a few flights performed by the same individuals (n = 3; see **Table 1**).

Flight strategies identification

Identification of flight strategies from the ensemble of sea migratory flights was performed by classifying the diverse migratory flights into several groups, where groups corresponded to flights sharing the same characteristics. To describe the flights, I used a large ensemble of descriptive variables accounted for: flight duration, direction, altitude, ascent speed, time of flight spent at a given altitude (n = 19 variables). After checking for strong correlations between pairs of variables (Pearson correlation test, $r > 0.65$), 8 variables were kept and used as descriptors of the flights: direction between the first and the last point of the flight (degrees; with 0° = 360° = North), duration of the flight (hours), median altitude (meters), maximum altitude of the flight (meters), time to reach maximum altitude (hours), ascent speed during the first quarter of the flight (meters/minutes), time spent in the 200-500 m altitudinal zone and in the 500-1000 m altitudinal zone (minutes).

The first step was to determine the number of groups. Using the *NbClust* package in R, the optimal number of clusters was determined based on the results of 30 statistical indices calculated for a theoretical classification ranging from 2 to 15 clusters. *NbClust* proposes the best clustering scheme by evaluating different combinations of the number of clusters, distance measures, and clustering methods. I found that the best number of groups was probably either 2 or 5 groups but given the apparent variations in strategies and the large number of different species, I chose the classification in five groups which might make more biological sense.

Then, the flights classification was conducted using the Partitioning Around Medoids (PAM) method (Van der Laan *et al*., 2003). In PAM method, a medoid is defined as a representative object of a dataset, whose sum of dissimilarities to all the objects belonging to a given cluster is minimal. This algorithm started by randomly choosing five medoids (*i.e*. here five flights) from all the flights. After

that, each remaining flight was assigned to the nearest medoid, forming initial clusters. The algorithm iteratively refined these clusters by swapping each medoid with non-medoids and recalculating the sum of dissimilarities. The swap that resulted in the lowest sum was accepted. This process continued until no further reduction was possible, resulting in five optimized clusters, containing flights with similar characteristics.

The last step was a validation process of the classification. Classification methods are generally efficient, but some misclassification might happen for few individuals. In order to identify those individuals, I calculated the Silhouette Index (Rousseeuw, 1987), taking values in the interval [-1; 1], that gave the probability that an individual (here a migratory flight) was well classified (positive value), between two groups (value near zero) or misclassified (negative value). As the "real" groups are unknown, I assumed that misclassified flights (according to Silhouette Index) were more probably in the neighbouring group. Therefore, flights with negative index value were manually reclassified from their original group to the neighbouring group, in which they had more probability to belong. Note that these reclassified flights (n = 10) represented 8.2% of the total number of flights.

Weather conditions before migration initiation

The two important goals of this study were 1. to identify the weather conditions associated with the departure event ("Departure model" hereafter in *Methods*) and 2. to analyse the effects of weather conditions experienced before departure on the choice of a given flight strategy to cross the Mediterranean Sea ("Flight strategy model" hereafter). As time and place of departure had been identified before, I retrieved weather data for the days preceding the event. Here, raw climate data were downloaded from reanalysis models ERA5-Land (grid resolution = 9 km) or ERA5 (grid resolution = 31 km) from the Copernicus Climate Change Service. Using ERA5-Land dataset, the following hourly raw variables were downloaded, for the four days (96 hours) preceding the time of migratory flight departure, for the grid cell nearest to, or including the place of departure: total rainfall accumulation (meters), surface atmospheric pressure (Pa), northward (u) and eastward component (v) vectors of the wind (meters/second), air temperature at 2m above ground (Kelvin). Hourly cloud cover (%) was downloaded from ERA5 dataset, as this parameter was not available at a finer resolution with ERA5-Land.

From these raw weather data, six "summary" variables were created, for each of the four days, preceding the hour equal to the effective hour of flight start on departure day: a 24h temperature trend

(°C/hour), a 24h atmospheric pressure trend (hPa/hour), a 6h mean cloud cover (%), a 6h sum of total rainfall (millimetres), a 6h mean wind direction (°) and a 6h mean wind speed (meters/second). Trends were estimated on a 24-hour period, to consider the variation of pressure and temperature over the day preceding departure time. Wind speed and direction were estimated using u and v components of the wind, and applying the following formulas, commonly used for conversion: $wind\ speed = \sqrt{u^2 + v^2}$ and $wind\ direction = \left(atan2(u, v) \times \frac{180}{\pi} + 180\right) mod 360$. Then, to avoid difficulties of analysis interpretation due to circularity of wind direction (i.e. an angle value in degrees, from 0 to 360, with 0 and 360 values both corresponding to northerly wind), wind directions values were converted into 4 classes of directions, from which the wind is blowing: north (≥ 315 to < 45°), east (≥ 45 to < 135°), south (≥ 135 to < 225°) and west (≥ 225 to < 315°) winds).

Modelling weather conditions effects

Departure model

First, to identify the weather conditions associated with the event of migration departure, a comparison between conditions experienced during the day of departure (*i.e.* the 24-hour period preceding departure event) and the conditions experienced during the three days preceding the day of departure (*i.e.*, when individuals did not depart) was realised. Hence, the event of departure was considered as the response variable: 0 = a day when the bird has not started to migrate; 1= the day when the bird departed. To model this variable, I used generalized linear models with mixed effects (hereafter "GLMMs"). The full model included the six scaled weather variables, with one value for each day of the pre-departure period as additive effects, and a random effect of the species, to integrate the eventual variability of the effects due to the variety of species (n = 15) integrated in the analysis dataset.

Then, a model selection was performed to achieve the best compromise between a good fit of the model to the data and a reliable estimation of model parameters. Given to the size of the dataset and the number of parameters in the full model, I used the AIC (Akaike Information Criteria), corrected for small samples (AICc), as a selection criterion. All possible models containing from one to six additive effects and the null model (intercept only) were constructed and sorted by decreasing AICc values in a stepwise descending procedure. Between all the competitive models with ΔAICc ≤ 2, the model with the higher AICcWeight (*i.e.* likelihood that a model is the best for explaining the relationships in analysed data) was selected as the best model.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Flight strategy model

To assess if weather conditions experienced by migratory birds during hours prior to the start of migration flight influenced the choice of a flight strategy above the sea, a modelling analysis was performed. As detailed before, migration flights were classified into five groups. Each of them defined one possible flight strategy with its own characteristics. Consequently, I used the fact to belong or not to one of these strategies as the response variable, hence being a binary variable: a response value of 1 indicated that a flight belongs to one strategy and a response value of 0 indicated that the same flight belongs to one of the four remaining strategies. As migratory flights were classified into five strategies, five response variables were built on this scheme, and the modelling method was applied to each of them.

Second, generalized linear models (hereafter "GLMs") with a binomial distribution of the response were built. The full model included the six scaled weather variables for the day before departure time as additive effects. All variables were included as no strong correlation link was identified between each pair of quantitative variables (Pearson correlation test, $-0.4 < r < 0.4$). A model selection procedure was also performed here, after building all possible models containing from one to six weather variables as additive effects and the null model. All models contained the species random effect. The best model was finally identified using the same criteria and procedure than for "departure" models, detailed above.

All the data preparation, classification of flight strategies and modelling were conducted using both QGIS v3.28.3 (QGIS Development Team, 2023) and R v4.3.2 (R Development Core Team, 2023), using packages, and particularly: *cluster*, *corrplot*, *elevatr*, *geosphere*, *glmmTMB*, *KrigR*, *lme4*, *move*, *MuMIn*, *NbClust*, *ncdf4*, *raster*, *RVAideMemoire*, *sf*, *sp* and *tidyverse*.

Results

Effects of weather conditions on departure probability

The GLMM model selection procedure identified the model including fixed effects of rainfall (6h), wind direction (6h), pressure (24h) and temperature (24h) (**Table 2**; pseudo-R^2 = 0.161). As all models compared in model selection procedure, the selected model included a random effect of the species (variance < 0.001; standard deviation < 0.001).

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Table 2. Results of model selection procedure, to explain migration departure probability as function of weather conditions experienced during pre-departure period. Here, only competitive models (with ΔAICc ≤ 2) are presented. The selected model is indicated in bold. All models included random effect of species.

Response variable	Effects	df	AICc	ΔAICc	ωAICc
Migration departure probability	**Rainfall (6h sum) + Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend) + Wind direction (6h mean)**	**8**	**495.50**	**0.00**	**0.156**
	Rainfall (6h sum) + Pressure (24h trend) + Wind direction (6h mean)	7	496.10	0.56	0.118
	Cloud cover (6h mean) + Rainfall (6h sum) + Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend) + Wind direction (6h mean)	9	496.60	1.13	0.089
	Cloud cover (6h mean) + Rainfall (6h sum) + Pressure (24h trend) + Wind direction (6h mean)	8	496.70	1.18	0.087
	Rainfall (6h sum) + Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend) + Wind direction (6h mean) + Wind speed (6h mean)	9	497.30	1.78	0.064

The probability of departure decreased with rainfall occurring during the 6 hours period preceding departure (**Figure 2A**). Conversely, this probability increased with atmospheric pressure and temperature variations during day before departure (**Figure 2B & C**). Finally, departure probability was higher when wind was blowing from north or west directions than from east or south directions (**Figure 2D**).

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

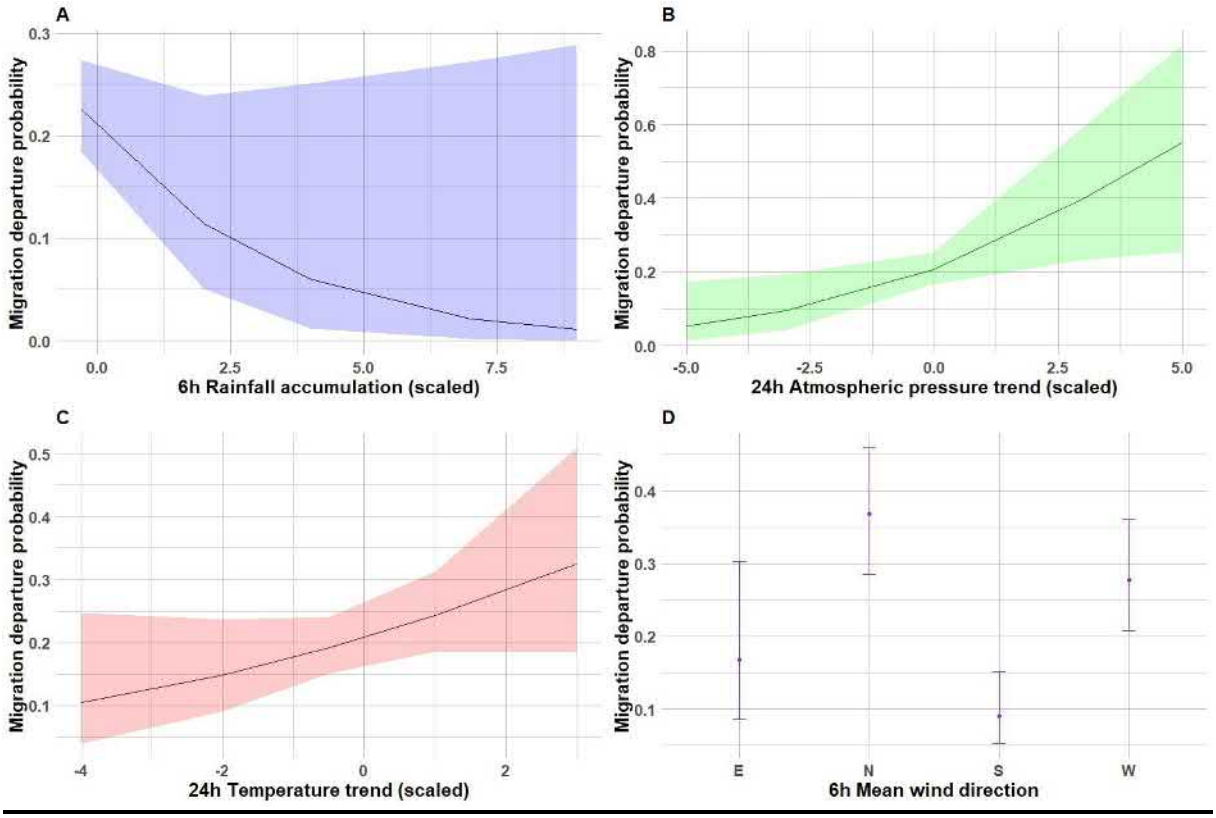


Figure 2. Estimation (mean with 95% CI) of migration departure probability as function of fixed effects of the best model (after model selection, see **Table 2**). **A**. Effect of rainfall accumulation (variable initially in millimetres, scaled for modelling) during the 6-hour period preceding departure event. **B**. Effect of variation of atmospheric pressure (initially in hPa, scaled), on a 24-hour period prior to departure. **C**. Effect of variation of temperature at 2 meters above ground (initially in °C, scaled), on a 24-hour period leading up to departure. **D**. Effect of wind direction at 10 meters above ground (initially in degrees, scaled and converted into classes), on a 6-hour period before departure.

Identification of flight strategies to cross the Mediterranean Sea

The migratory flight classification procedure identified five groups of flights, defining five strategies to cross the Mediterranean Sea. Characterisation of each strategy (**Figure 3**) and description of flight repartition between strategies (**Table 3**) are synthesised hereafter.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

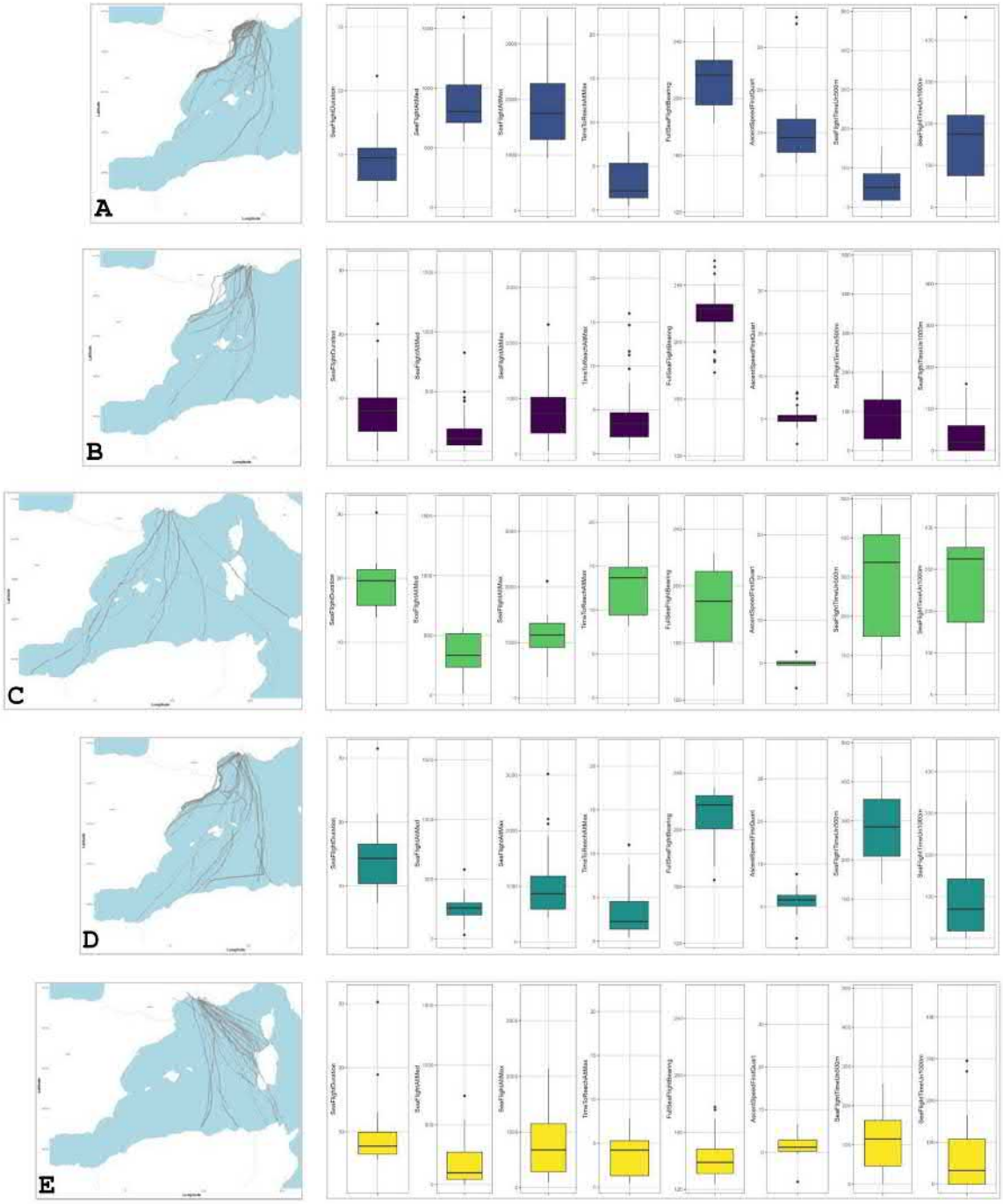


Figure 3. Characterisation of flight strategies to cross the Mediterranean Sea. Left panel gives the trajectories of flights belonging to each strategy. Right panel contains boxplots of descriptive variables values for each group of flights. See *Flight Strategies Identification* in *Methods* for detailed information on descriptive variables **A**. Strategy 1 (n = 45 flights); **B**. Strategy 2 (n = 19); **C**. Strategy 3 (n = 8); **D**. Strategy 4 (n = 23) and **E**. Strategy 5 (n = 26).

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

Table 3. Flights repartition between strategies and species. Species are classified by ecological groups.

Ecological group	Species	Strategy n°1	Strategy n°2	Strategy n°3	Strategy n°4	Strategy n°5
Shorebirds	Eurasian Dotterel (*Charadrius morinellus*)	1	4	1	5	0
	Black-tailed Godwit (*Limosa limosa*)	0	0	0	0	1
	Pied Avocet (*Recurvirostra avosetta*)	2	1	0	0	0
Raptors	Lesser Kestrel (*Falco naumanni*)	4	2	4	2	0
Waterbirds	Purple Heron (*Ardea purpurea*)	3	2	1	2	1
	Squacco Heron (*Ardeola ralloides*)	5	4	1	4	3
	Little Bittern (*Ixobrychus minutus*)	0	0	0	0	1
	Slender-billed Gull (*Chroicocephalus genei*)	0	0	0	0	5
	Gull-billed Tern (*Gelochelidon nilotica*)	0	2	1	3	0
	Greater Flamingo (*Phoenicopterus roseus*)	0	0	0	0	6
	Eurasian Spoonbill (*Platalea leucorodia*)	20	0	0	7	6
	Glossy Ibis (*Plegadis falcinellus*)	3	1	0	0	0
Landbirds	Great spotted Cuckoo (*Clamator glandarius*)	2	2	0	0	0
	European Roller (*Coracias garrulus*)	0	0	0	0	3
	Turtle Dove (*Streptopelia turtur*)	5	1	0	0	0

Flight strategies (**Figure 3**) could be summarized as follow: **strategy n°1** (n = 45 flights) pooled individuals flying along the Iberian Peninsula coast at low altitude (< 500 m); **strategy n°2** (n = 19 flights) implied flying at a high altitude (associated with a high ascent speed at the beginning of the flight), over the western Mediterranean Sea or crossing in south direction over Balearic Islands without stopping; **strategy n°3** (n = 8 flights) considered flights directly crossing the sea towards a large range of directions, to reach North Africa or Sicilia, with a median flight duration near 20 hours; **strategy n°4** (n = 23 flights) included flights above the western Mediterranean Sea, with a median duration of 15 hours, with individuals spending most time in the 200 to 500 meters altitudinal layer; and **strategy n°5** (n = 26 flights) was mainly characterized by flights oriented toward the south east, reaching Sardinia or North Africa (*e.g.* Tunisia).

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

GLMs were constructed for each flight strategy. models explaining choice of flight strategy n°2 and n°4 were not well adjusted, hence I did not consider them as results might be biased and not generalisable. Concerning other well-adjusted models (strategies 1, 3, 5), the model selection as conducted to select one model for each strategy (**Table 4**).

Table 4. Results of model selection procedure, to explain the choice of a given flight strategy probability as function of weather conditions experienced during pre-departure period. Here, only competitive models (with $\Delta AICc \leq 2$) are presented for each response variable. The selected model is indicated in bold. All models included random effect of species. *null* = null model, containing intercept only.

Response variable	Effects	df	AICc	ΔAICc	ωAICc
Choice of flight strategy n°1 probability	**Wind direction (6h mean)**	**4**	**157.10**	**0.00**	**0.145**
	Wind direction (6h mean) + Wind speed (6h mean)	5	158.00	0.98	0.089
	Temperature (24h trend) + Wind direction (6h mean)	5	158.20	1.10	0.084
Choice of flight strategy n°3 probability	**Temperature (24h trend)**	**2**	**60.60**	**0.00**	**0.130**
	null	1	61.00	0.38	0.108
	Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend)	3	61.80	1.18	0.072
	Pressure (24h trend)	2	62.10	1.50	0.062
Choice of flight strategy n°5 probability	**Wind speed (6h mean)**	**2**	**124.20**	**0.00**	**0.111**
	Cloud cover (6h mean) + Pressure (24h trend) + Wind speed (6h mean)	4	124.60	0.39	0.091
	Cloud cover (6h mean) + Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend) + Wind speed (6h mean)	5	124.70	0.52	0.086
	Temperature (24h trend) + Wind speed (6h mean)	3	124.80	0.57	0.084
	Pressure (24h trend) + Wind speed (6h mean)	3	125.00	0.82	0.074
	Cloud cover (6h mean) + Wind speed (6h mean)	3	125.40	1.16	0.062
	Pressure (24h trend) + Temperature (24h trend) + Wind speed (6h mean)	4	125.50	1.31	0.058
	Cloud cover (6h mean) + Temperature (24h trend) + Wind speed (6h mean)	4	125.90	1.70	0.048

The probability of choosing strategy 1 (flights at low altitudes, following the Iberian coast) increased when wind was blowing from the east 6h pre-departure (pseudo-R^2 = 0.104**; Figure 4A**). For strategy 3, the probability of directly crossing the Mediterranean Sea with long flights was negatively related to 24h pre-departure variation of temperature (pseudo-R^2 = 0.024; **Figure 4B**). For strategy 5, the probability of crossing the sea while flying towards the south-east direction was positively associated with 6h pre-departure mean wind speed (pseudo-R^2 undetermined as the model was fitted with a Cauchy distribution; **Figure 4C**).

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille

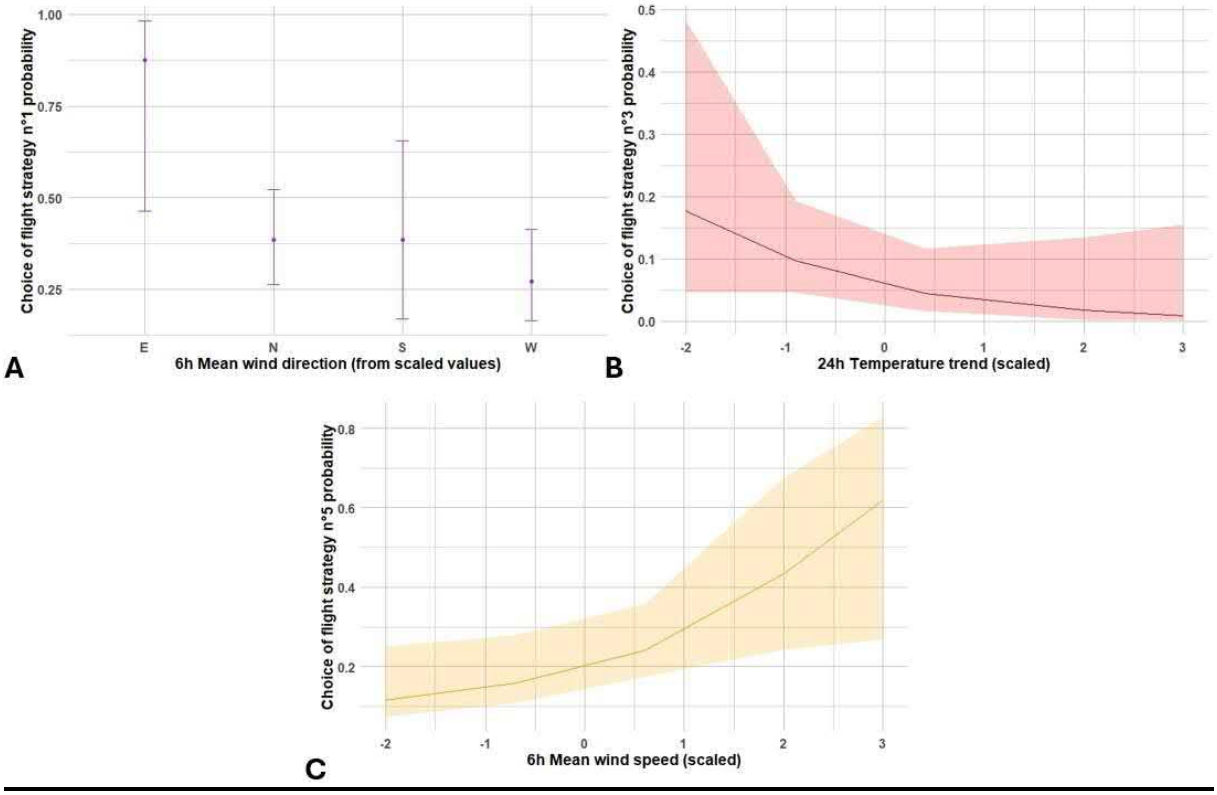


Figure 4. Estimation (mean with 95% CI) of a given flight strategy probability to be chosen by individuals as function of fixed effects of the best model (after model selection, see **Table 4**). **A**. strategy 1: Effect of wind direction at 10 meters above ground (initially in degrees, scaled and converted into classes), on a 6-hour period before departure. **B**. strategy 3: Effect of variation of temperature at 2 meters above ground (initially in °C, scaled), on a 24-hour period preceding departure. **C**. strategy 5: Effect of wind speed at 10 meters above ground (initially in m/s, scaled), on a 6-hour period before departure.

Discussion

This work is among the first to study the determinants of migration departure for individuals facing a major ecological barrier, and associated strategies of crossing. The use of telemetry data permitted to overcome individual tracking biases where the probability of detection varied greatly and depended on field methods (*e.g*. capture mark recapture methods). Moreover, by simultaneously studying 15 species, with various ecological characteristics, the robustness of the results was enhanced. First, I found that the probability of individual departure decision was affected by four factors: atmospheric pressure, temperature, rainfall and wind direction. Secondly, impact of weather conditions on flight strategy choice used to cross the Mediterranean Sea was investigated after strategies identification. Here, it appeared that some particular weather conditions influenced the choice of a given strategy. However, a large part of the strategy choice appeared to be guided by species migratory habits.

Effects of weather conditions on departure probability

Our results mostly confirmed previous results in other migratory species and in other geographical contexts (*e.g*. see Shamoun-Baranes *et al.*, 2017). Cooper *et al*. (2023), showed that weather conditions influenced the probability of departure decisions in four songbird species both in spring and autumnal migration and in multiple regions across North America. Among the results of the latter study, the probability of departure increased with pressure rise regardless of species. In my study, individuals were more likely to depart when pressure has increased over the 24 hours period. The common explanation is that rising pressure, in western Europe, is generally associated with anticyclonic conditions, synonyms of upcoming calm winds, clear skies (*i.e*. permitting the use of celestial cues to orient: Berthold, 2001), low precipitation risk and generally warm temperatures (Shamoun-Baranes *et al.*, 2017). All these conditions improve the probability of successfully crossing the ecological barrier, and individual survival (Lok *et al*., 2015). Similarly, the positive effect of temperature rise over the day preceding departure was potentially linked with an indication of safer conditions for migration. Conversely, precipitations affecting negatively departure decision might be perceived by individuals as a higher risk of upcoming inclement conditions for crossing the sea, and consequently, they could choose to postpone their departure, waiting for better conditions (Packmor *et al*., 2020). The effect of wind direction on departure decisions is easily explained by the need for birds to benefit from wind support during the migratory flight (Shamoun-Baranes *et al*., 2017). For birds departing from the shores of the Gulf of Lion to cross the Mediterranean Sea towards Africa, north and west winds yielded beneficial wind conditions for the

flight. Given that tailwind could increase travel speed while headwind would slow down travel speed, wind direction could have strong consequences on flight energy cost, especially for long-distance migratory flights (Alves *et al*., 2017). This decision of birds to depart with suitable wind conditions was demonstrated for several species of birds crossing large marine areas, (*e.g.* Gulf of Mexico: Deppe *et al*., 2015).

Nevertheless, some weather parameters such as wind speed and cloud cover, yet known as predictors of migration departure decisions in birds, were integrated in the full model but not selected by model selection procedure. Surprisingly, wind speed was not a predictor of departure decision, but wind direction was. In migratory shorebirds, wind speed highly affects individual flight speed, thus permitting to reduce flight duration (*e.g*. positive wind support) with consequences on migration success (Alves *et al.*, 2017). This is especially the case when birds encounter strong headwinds or crosswinds during storms that can drift them from their original route. In my interpretation, the absence of wind speed effect in the present study could be partly explained by the geographical context of the study. All individuals departed in late summer or autumn, from the shores of the Gulf of Lion, where the strongest winds were generally oriented from north-west or north (*i.e*. respectively called "tramontane" or "mistral"). Therefore, chosen wind directions are probably already associated with the strongest supportive winds. Nevertheless, wind speed appears to be more related to migration routes (Wainwright *et al*., 2016) and flight characteristics (*e.g*. flight speed: Alves *et al*., 2017) than directly to departure decisions, even if it could be expected than strong favourable winds at the place of departure might be a good cue for a faster migration, especially for the next 10 to 15 hours, to cross the ~700 km of Mediterranean Sea directly. An alternative to test both the effect of wind direction and speed on departure decision could be to use an interaction between the two variables as a predictor in the models of departure, to test for the accuracy of a geographical effect (*i.e*. strong winds blowing in majority from north-west) or to balance the wind direction importance in relation with wind speed (a beneficial wind direction might be crucial for initiation of departure in strong wind conditions).

Cloud cover did not affect departure decision, while we expected a negative effect on departure probability. It is now well-known and documented, using controlled experiments, that birds use celestial cues (for nocturnal migrants) and to a great extent visual cues in the landscape to orient themselves during their migrations (Berthold, 2001). Here too, local geographical context might explain study result. When wind is blowing from land (*i.e*. northerly), the sky is generally clear, while when it is south-oriented (*i.e*. coming from the sea), the sky is overcasted. However, no strong correlation was detected between cloud

cover and wind direction in my data. Nevertheless, effect of cloud cover during the last hours before departure might be limited, as it has also been suggested that birds relied firstly on magnetic cues, especially when other cues are unavailable (*e.g*. absence of celestial cues with an overcast sky). Moreover, individuals may have the ability to integrate celestial cues information during the nights preceding the night of departure (Muheim *et al*., 2006).

The random effects of species in the selected model contained an extremely small part of the variance, which indicated that weather variables integrated in the model influenced departure decision of individuals belonging to the 15 species in the same manner. Thus, our results seem to be generalizable to various species, which greatly differ in their ecology and morphology. Their morphology is different, which affect their migratory flight characteristics and consequently their response to weather conditions, as species using flapping flight as European Roller (*Coracias garrulus*), may be less affected by weather than those using soaring flight (*i.e*. dependant to thermal conditions) as Lesser Kestrel (*Falco naumanni*). Their social behaviour in migration also differed, with some species such as Eurasian Spoonbill (*Platalea leucorodia*) or Greater Flamingo (*Phoenicopterus roseus*) migrating in groups, while individuals from other species are migrating alone such as Spotted Cuckoo (*Clamator glandarius*) or European Roller. This social behaviour might affect both migration flight strategy and decision of departure.

Identification of flight strategies to cross the Mediterranean Sea

In the second part, migratory flights were classified into five groups, defining five potential flight strategies to cross the Mediterranean Sea. Moreover, each strategy could be described by a combination of at least one or two descriptors. This confirmed that chosen descriptors (n = 8) were well-informative of flights belonging to each strategy.

Considering the repartition of 15 species between the 5 strategies, 7 species were present in only one or two groups (considering species with more than two individuals in the study, n = 13), while individuals from 6 species used at least four distinct flight strategies to cross the Mediterranean Sea. These results suggest that migratory habits strongly influence how individuals cross the sea in several species, from similar ecological groups. Among waterbirds, Eurasian spoonbills (*i.e*. the species with the highest number of migratory flights at sea (n = 33) in the dataset) were mainly performing flights along the Iberian Peninsula (strategy 1), as two thirds of individuals departing from their breeding sites in Camargue reached the Ebro Delta (Spain), to winter or to make a stopover before reaching Africa. A

similar trend was observed in Glossy Ibis (*Plegadis falcinellus*) wintering in the Ebro Delta (note than species wintering sites were not well-known before 'MigraLion' program : Champagnon, *pers. comm*.). However, remaining Eurasian spoonbill individuals (n = 13) used strategies n°4 or n°5, both to reach Sardinia. The same phenomenon was observed for Greater Flamingo, with all individuals included in the study used strategy n°5 to reach Sardinia, before following their route towards Africa or Greece. Conversely, other species, from distinct ecological groups, like waterbids (*e.g.* Purple Heron (*Ardea purpurea*), Squacco Heron (*Ardeola ralloides*)), landbirds (*e.g.* Lesser Kestrel), or shorebirds (*e.g.* Eurasian Dotterel) use respectively five and four strategies to cross the Mediterranean Sea, showing a great flexibility in the strategy choice. Here, migratory habits could also partly explain the choice of the strategy used, as wintering sites were broadly distributed across Africa, hence depending on their ultimate wintering destination, individuals might choose the strategy allowing to reach wintering ground with minimum time (Hedh & Hedenström, 2023).

Effects of weather conditions on flight strategy choice

Weather conditions also influenced the choice of flight strategy. Birds which chose to fly along the Iberian Peninsula were mainly influenced by wind blowing from the east during the 6 hours preceding departure (allowing tailwind support, in agreement with our hypotheses; Deppe *et al*., 2015). Similarly, influence of wind speed on flights easterly oriented towards Sardinia might be also explained by the local meteorological context, with strongest winds blowing from northwest in this region of the Mediterranean Sea, offering highly suitable wind support. Finally, increase of temperature has a negative effect on long flights across the sea. Locally, "mistral" episodes are commonly associated with a temperature decrease, clear skies, and a strong southward wind. This certainly represents highly favourable conditions for birds choosing to cross directly the sea towards their breeding grounds, resulting in optimisation of energetic costs (Alves *et al*., 2017). Moreover, especially for species with a late migration phenology, a decrease of temperature might be indicative of upcoming deterioration of weather conditions. Therefore, individuals might not have the choice to postpone their departure, as they are time constrained to reach their wintering grounds (Shamoun-Baranes *et al*., 2017).

Perspectives and limitations

I investigated the effects of weather conditions on individuals departure decision considering a departure period of 4 days preceding the time of departure. As a consequent number of species with high inter- and intra-specific variation in migration phenology was included in the study, it was necessary to

define a restricted time period preceding departure, in which weather conditions were compared with days when the bird did not depart versus the departure day. Some studies on weather effects on departure decision were conducted on stopover sites (*e.g.* Packmor *et al*., 2020; Cooper *et al*., 2023), where it is easier to know the bird's exact arrival time on site and compare weather conditions throughout the time period it stayed (*e.g*. see Cooper *et al*., 2023). However, it could be possible that individuals took their decision over a longer period of time, or conversely, during the last hours before their departure, as migration departure generally follows circadian rhythm of individuals. A sensitivity analysis, aiming to determine optimal period duration when individuals took their departure decision (e.g. see Schwemmer *et al*., 2021) might be appropriate here.

In addition to weather conditions, other ecological factors might have a strong impact on individual decision of departure. For the majority of species breeding in the study site, the phenology of moult could be an important factor driving the departure decision as a partial moult usually postpones the migration departure of an individual, even if weather conditions were favorable (Drent *et al*., 2003). Lastly, concerning studied species realising stopovers in the terrestrial part of the Gulf of Lion, as Eurasian Dotterel (*i.e.* initially departing from Scandinavian regions), the arrival date on stopover site highly contribute to the departure decision from the site, as it implies that individual has refueled during his stopover (Drent *et al*., 2003).

Concerning effects of weather conditions on flight strategy choice, some of the selected models only explain a restrained proportion of the variance. Therefore, other intrinsic factors might also explain this choice, like the sex or the age of the individual. Juvenile individuals perform their first migration in autumn, obviously less experienced than adult birds, especially when migrating alone. Here, it could be interesting to see if solitary juveniles choose different strategies than adult conspecifics. Moreover, an effect of the phylogeny (*e.g*. taxonomic order) could be tested if more flights had been available. This, in order to test statistically the influence of migratory habits on the choice of a given strategy, as individuals from the same order – or more largely from the same ecological group – share similarities in migration determinants (*e.g.* genetics, social behaviours). This effect was not included in the models here, as each species (or higher taxonomic rankings) were not present at least once in each group of flights defining a strategy. Finally a limit also exists in the strength of statistical relationships between strategy choice and weather for strategies n°2 and n°4 (*i.e*. partly because of small sample size in those groups). Here, to improve the strength of the results, and see if they are generalisable, it should be interesting to

include other migratory flights with the post-breeding migratory flights which will be realised in the 2024 season.

Conclusion

Results on the influence of weather on migration departure confirmed the introductive hypotheses, agreed with previous studies and seemed to indicate that weather conditions' influence on departure decision was common on a large panel of species, from four various ecological groups. Then, it appeared that the flight strategy choice to cross the Mediterranean Sea was influenced by particular weather conditions. However, a large part of the strategy choice appeared to be guided by species migratory habits. A limit persists as some strategies were chosen by a small number of individuals, limiting therefore the generalisation of modelling results to other species crossing the Mediterranean Sea, or similar marine barriers. This last point needs further investigation. An application of the study's questions to the spring migration might be of great interest, as individuals face decisive time constraints, with the urge to breed and reach breeding grounds as soon as possible. In this context, migratory decisions might have strong effects on individual fitness. Afterwards, another perspective will be to study how weather conditions changes experienced during migratory flight influence the individual abilities, and strategy adjustments when crossing ecological barriers, like the Mediterranean Sea, as adverse weather during crossing is associated with higher mortality, potential consequences on population dynamics and related conservation problematics.

References

Alerstam, T. (1990). Bird Migration. Cambridge University Press, Cambridge, 420 p.

Alerstam, T. (2001). Detours in bird migration. *Journal of Theoretical Biology*, *209*(3), 319-331.

Cooper, N. W., Dossman, B. C., Berrigan, L. E., Brown, J. M., Cormier, D. A., Bégin Marchand, C., ... & Marra, P. P. (2023). Atmospheric pressure predicts probability of departure for migratory songbirds. *Movement Ecology*, 11(1), 23.**Deppe, J. L**., Ward, M. P., Bolus, R. T., Diehl, R. H., Celis-Murillo, A., Zenzal Jr, T. J., ... & Cochran, W. W. (2015). Fat, weather, and date affect migratory songbirds' departure decisions, routes, and time it takes to cross the Gulf of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(46), E6331-E6338.

Diehl, R. H., Bates, J. M., Willard, D. E., & Gnoske, T. P. (2014). Bird mortality during nocturnal migration over Lake Michigan: A case study. *The Wilson Journal of Ornithology*, *126*(1), 19-29.

Gill Jr, R. E., Douglas, D. C., Handel, C. M., Tibbitts, T. L., Hufford, G., & Piersma, T. (2014). Hemispheric-scale wind selection facilitates bar-tailed godwit circum-migration of the Pacific. *Animal Behaviour*, *90*, 117-130.

Hedh, L., & Hedenström, A. (2023). Consequences of migratory distance, habitat distribution and season on the migratory process in a short distance migratory shorebird population. *Movement Ecology*, *11*(1), 40.

Léandri-Breton, D. J., Lamarre, J. F., & Bêty, J. (2019). Seasonal variation in migration strategies used to cross ecological barriers in a nearctic migrant wintering in Africa. *Journal of avian biology*, *50*(6).

Lok, T., Overdijk, O., & Piersma, T. (2015). The cost of migration: spoonbills suffer higher mortality during trans-Saharan spring migrations only. Biology letters, 11(1), 20140944.

McLaren, J. D., Shamoun-Baranes, J., & Bouten, W. (2012). Wind selectivity and partial compensation for wind drift among nocturnally migrating passerines. *Behavioral Ecology*, 23(5), 1089-1101.

Morganti, M., Mellone, U., Bogliani, G., Saino, N., Ferri, A., Spina, F., & Rubolini, D. (2011). Flexible tuning of departure decisions in response to weather in black redstarts *Phoenicurus ochruros* migrating across the Mediterranean Sea. *Journal of Avian Biology*, *42*(4), 323-334.

Muheim, R., Phillips, J. B., & Akesson, S. (2006). Polarized light cues underlie compass calibration in migratory songbirds. *Science*, *313*(5788), 837-839.

Newton, I. (2023). The migration ecology of birds. Elsevier.

Packmor, F., Klinner, T., Woodworth, B. K., Eikenaar, C., & Schmaljohann, H. (2020). Stopover departure decisions in songbirds: do long-distance migrants depart earlier and more independently of weather conditions than medium-distance migrants? *Movement Ecology*, 8(1), 1-14.

QGIS Development Team (2023). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org.

R Development Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. http://www.R-project.org.

Richardson, W. J. (1978). Timing and amount of bird migration in relation to weather: a review. *Oikos*, 224-272.

Salewski, V., & Bruderer, B. (2007). The evolution of bird migration—a synthesis. *Naturwissenschaften*, *94*, 268-279.

Sjöberg, S., Alerstam, T., Åkesson, S., Schulz, A., Weidauer, A., Coppack, T., & Muheim, R. (2015). Weather and fuel reserves determine departure and flight decisions in passerines migrating across the Baltic Sea. *Animal Behaviour*, 104, 59-68.

Sjöberg, S., Malmiga, G., Nord, A., Andersson, A., Bäckman, J., Tarka, M., ... & Hasselquist, D. (2021). Extreme altitudes during diurnal flights in a nocturnal songbird migrant. *Science*, *372*(6542), 646-648.

Wainwright, C. E., Stepanian, P. M., & Horton, K. G. (2016). The role of the US Great Plains low-level jet in nocturnal migrant behavior. *International Journal of Biometeorology*, *60*, 1531-1542.

Winger, B. M., Auteri, G. G., Pegan, T. M., & Weeks, B. C. (2019). A long winter for the Red Queen: rethinking the evolution of seasonal migration. *Biological Reviews*, *94*(3), 737-752.

Office français de la biodiversité
Délégation de façade maritime Méditerranée
Immeuble CMCI - 4ème étage
2, rue Henri Barbusse
13 001 Marseille