



Rapport final

Suivi radar
30 novembre 2022

**Etude des mouvements
d'oiseaux par radar depuis le
mât de mesures de Fécamp**

Réseau administratif

Citation recommandée	Biotope, 2022. Etude des mouvements d'oiseaux par radar depuis le mât de mesure de Fécamp. Rapport final	
Version/Indice	VF	
Date	30/11/2022	
Nom de fichier	EOHF_MSu5_suivi_radar_Rapport_final_VF	
Maître d'ouvrage	Eoliennes Offshore des Hautes Falaises	
Interlocuteur	Camille SENN	Camille.Senn@edf-re.fr
Biotope	Vincent DELCOURT Camille ASSALI	vdelcourt@biotope.fr cassali@biotope.fr

Biotope est signataire de la « [Charte d'Engagement des Bureaux d'Études dans le domaine de l'évaluation environnementale](#) ».

1	Introduction	5
1.1	Objectifs du suivi	5
1.2	Rappel du contexte et moyens mis en œuvre	5
2	Méthode	6
2.1	Equipe	6
2.1.1	Diadès Marine	6
2.1.2	Biotope	6
2.2	Matériel	6
2.2.1	Type de radar	6
2.2.2	Installation	7
2.2.3	Fonctionnement	8
2.3	Traitement des données	10
2.3.1	Préparation des données	10
2.3.2	Sélection des trajectoires	11
2.4	Disponibilité des données en fonction de la hauteur de houle	14
3	Résultats	15
3.1	Phénologie mensuelle	15
3.2	Phénologie horaire	15
3.2.1	Mai	16
3.2.2	Juin	16
3.2.3	Juillet	17
3.2.4	Août	17
3.2.5	Septembre	18
3.2.6	Octobre	18
3.2.7	Novembre	19
3.2.8	Janvier	19
3.2.9	Février	20
3.2.10	Mars	20
3.2.11	Avril	21
3.3	Directions de vol	22
3.3.1	Mai	22
3.3.2	Juin	24
3.3.3	Juillet	26
3.3.4	Août	28
3.3.5	Septembre	30
3.3.6	Octobre	32
3.3.7	Novembre	34
3.3.8	Janvier	36
3.3.9	Février	38
3.3.10	Mars	40
3.3.11	Avril	42
3.4	Hauteurs de vol	44
3.4.1	Rappel de la méthode	44
3.4.2	Altitudes totales détectées	44
3.4.3	Mai	45
3.4.4	Juin	46
3.4.5	Juillet	47
3.4.6	Août	48
3.4.7	Septembre	49
3.4.8	Octobre	50

3.4.9	Novembre	51
3.4.10	Janvier	52
3.4.11	Février	53
3.4.12	Mars	54
3.4.13	Avril	55
3.5	Synthèse spatiale des déplacements	56
3.5.1	Répartition spatiale de l'activité	56
3.5.2	Synthèse cartographique des déplacements	56
4	Conclusion	59

1 Introduction

Ce document présente les résultats des 12 mois d'acquisition de données (mai 2021 à avril 2022) de la mesure de suivi « MSu5 – Suivi automatisé par radar de l'avifaune du parc éolien en mer de Fécamp ».

1.1 Objectifs du suivi

L'objectif de ce suivi est d'étudier l'utilisation spatio-temporelle du site par les oiseaux en phase avant travaux, et de recueillir notamment des données sur le déplacement des oiseaux (niveaux d'activité, mouvements diurnes/nocturnes, directions de vol, hauteur de vol).

Les réglages du radar ont été choisis afin de répondre au mieux à ces objectifs (cf. Partie 2 - Méthode).

1.2 Rappel du contexte et moyens mis en œuvre

Suite aux problèmes d'alimentation électrique ayant détérioré les premiers radars installés (un radar vertical et un radar horizontal), le choix a été fait d'intégrer un seul radar permettant de collecter les déplacements d'oiseaux en 3 dimensions, qui est une avant-première pour le suivi d'oiseaux en mer.

Les radars 3D développés pour le suivi des oiseaux sont des radars récents, et ces radars sont tous en phase de finalisation de leur processus de développement. Trois systèmes existent actuellement sur le marché, développés les sociétés Robin Radar (Pays-Bas), Swiss Birdradar (Suisse), et Diadès Marine (France).

Lors du choix du système, le radar hollandais ne disposait pas des autorisations d'émission en France et nécessitait une puissance électrique incompatible avec l'énergie disponible sur le mât. Le radar suisse était dans une phase moins avancée de développement, et a par ailleurs été développé dans un objectif principal de suivi de cibles de grande taille (ex : Milan royal) en conditions terrestres, avec un angle de vision de 90 degrés.

Le choix a donc été fait d'installer un prototype du radar 3DFlightTrack de la société Diadès Marine, qui répondait aux objectifs et critères d'intégration (dimension et poids permettant une installation en mer, puissance électrique compatible, contrôle total à distance).

2 Méthode

2.1 Equipe

2.1.1 Diadès Marine

Diadès Marine est une société spécialisée dans la fourniture de produits radar, notamment pour la détection de petites cibles en environnement maritime.

Dans le cadre de cette étude, Diadès Marine a eu en charge :

- la fourniture du matériel et sa maintenance ;
- les réglages et la calibration du radar ;
- le suivi du bon fonctionnement du système ;
- la fourniture de données corrigées.

2.1.2 Biotope

Biotope est un bureau d'études spécialisé en écologie et possédant une importante expérience en projets éoliens offshore et en suivi des oiseaux par radar.

Dans le cadre de cette étude, Biotope a eu en charge :

- la coordination et la gestion du projet ;
- l'analyse et l'interprétation des données ;
- la rédaction de rapports de fonctionnement et d'analyse.

2.2 Matériel

2.2.1 Type de radar

Le radar utilisé est un FlightTrack 3D de la société Diadès Marine, présentant les caractéristiques suivantes.

Caractéristiques	3DFlightTrack à Compression d'Impulsion, MTI/Doppler
Puissance Crête	2 x 12 kW (+/- 10%)
Technologie	Magnétron chirpable en fréquence Récepteur cohérent
Longueur d'Impulsion	De 1 à 4 µs
Résolution	De 7,5 m à 30 m selon le mode choisi
Angle de détection en azimut	360°
Angle de détection en élévation	20°
Bande de fréquence	X-Band (9.41 GHz +/- 30 Mhz)
Sensibilité	-117 dBm
Portée de détection instrumentée maximum	10 km
Filtrage de scène	Carte d'intensité optimisée Filtrage MTI/Doppler
Consommation électrique du radar	300W
Consommation électrique de l'unité de traitement	250W (max.)
Alimentation réseau fort électrique	230V AC
Alimentation réseau faible internet	Ethernet
Dimensions radôme	Diamètre: 1080 mm Hauteur: 1250 mm
Dimensions de l'unité de traitement	485 x 382 x 90 mm
Poids Equipement (Radar + Radome)	102 kg
Poids de l'unité de traitement	5.75 kg
Format de fichier	Fichier .csv
Précision de l'altitude	+/- 2 %

2.2.2 Installation

Le radar a été installé le 18/06/2020, lors d'une opération en mer de 2 jours. Il est situé sur la plateforme du mât de mesures de Fécamp, à 25 mètres au-dessus du niveau de la mer.



Le suivi est effectué dans un volume de rayon de 6 km autour du mât de mesure (voir paragraphe 2.2.3.2), tronqué par un secteur aveugle de 120° lié à l'occultation du faisceau par la plateforme (container, grue, mât vertical, voir Figure 1). Cette contrainte d'installation, inhérente à tout suivi sur plateforme offshore, autorise néanmoins un grand volume de détection et n'affecte pas la représentativité des données enregistrées.

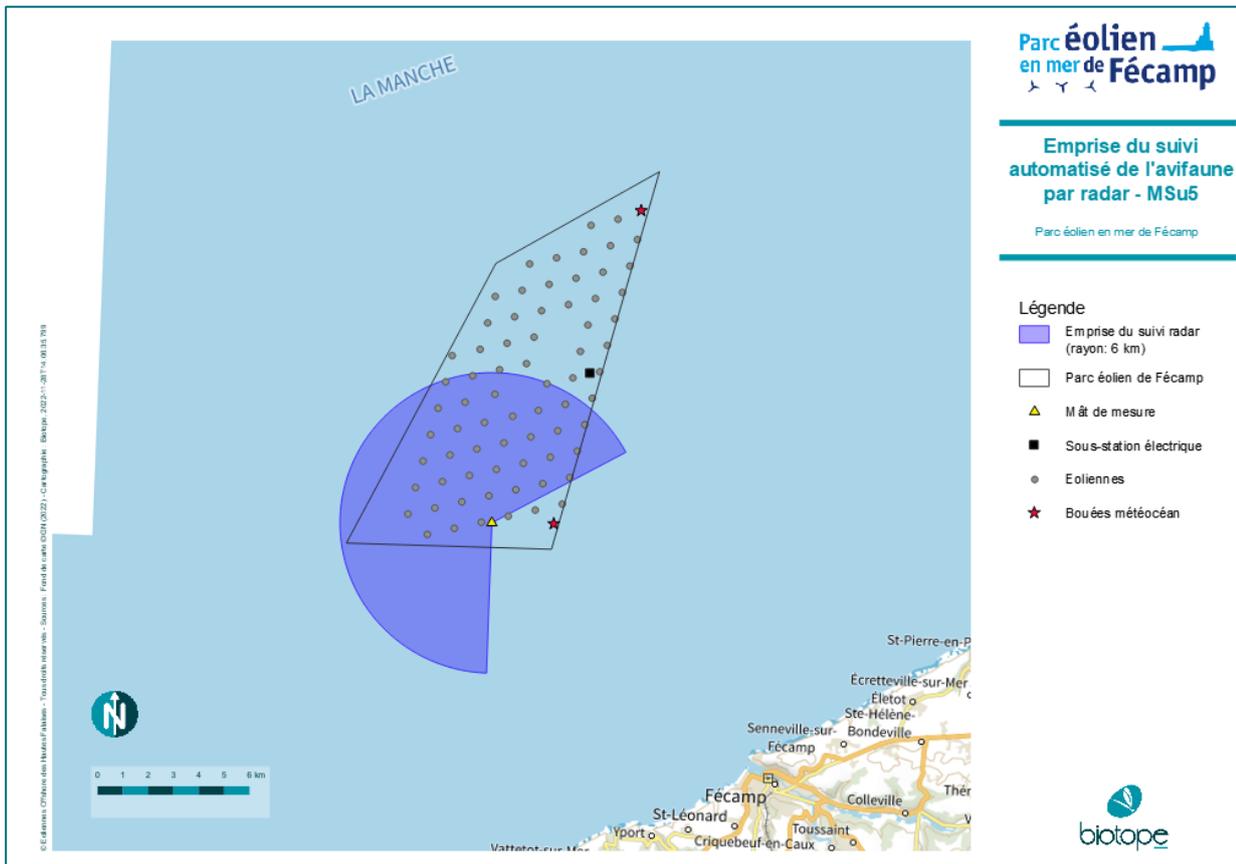


Figure 1: Emprises spatiales du suivi de l'avifaune par radar (mesure MSu5) et du parc éolien en mer de Fécamp.

2.2.3 Fonctionnement

2.2.3.1 Mise en service

Une fois installé, des problèmes d'alimentation électrique, de communication réseau et de mouvements du support radar ont à nouveau été identifiés (comme lors du suivi précédent avec 2 radars) et ont empêché le bon fonctionnement du système. Des interventions ont été menées par l'entreprise en charge de la maintenance du mât de mesure les 09/09/2020, 28/11/2020 et 25/03/2021 pour corriger ces problèmes.

Au cours de ces opérations ont notamment été changés par l'équipe en charge de la maintenance du mât de mesure : le support du radar, le système d'alimentation électrique (onduleur, régulateur, batteries, délesteurs, etc.), le système de communication réseau. L'équipe de Diadès Marine a dû de son côté procéder au remplacement du calculateur du radar et d'un bloc antenne qui avaient été détériorés par les défauts de l'alimentation électrique.

Le radar a dû être démonté et ramené à quai en novembre 2020 pour réparer les éléments endommagés.

Le radar n'a pu être remis en service qu'au 26/03/2021.

2.2.3.2 Réglages et calibration

La calibration et les réglages du radar ont été effectués entre le 29/03/2021 et le 30/04/2021.

Le paramétrage de tout radar est toujours un compromis qui doit être trouvé en fonction des objectifs du suivi et des limites du principe physique de fonctionnement du radar.

La capacité de détection d'un radar est en effet proportionnelle à la taille des cibles détectées, mais inversement proportionnelle à la distance de ces cibles. Un oiseau de grande taille sera ainsi détecté plus loin qu'un oiseau de taille inférieure à réglages équivalents.

L'échelle de détection et le mode de pulse influent aussi sur le type de cibles que le radar peut suivre. Pour suivre des cibles de toute petite taille (type passereau), le radar doit émettre des pulses courts sur une échelle de détection réduite (1000 mètres de rayon par exemple). Or cette configuration est très défavorable en mer car le bruit généré par la houle est proportionnellement plus important à proximité du radar (retour d'énergie plus élevé). Les radars qui réalisent la quantification de flux migratoires d'espèces de petites tailles sont ainsi des radars qui adoptent une détection verticale pour s'affranchir de

ces problèmes, et qui ne réalisent pas de suivi de trajectoires. La faible échelle induite ne permettrait pas d'étudier les déplacements d'oiseaux à macro-échelle, qui est l'objectif principal du suivi MSu5.

Le choix a donc été fait de maximiser l'échelle de détection, pour suivre le plus de déplacements d'oiseaux autour du mât et donc au niveau du futur parc éolien. Le radar installé ne permet par conséquent pas de suivre les passereaux et autres oiseaux de petite taille volant seuls ; les petits oiseaux volant en groupes peuvent toutefois être détectés.

La difficulté principale de suivi des oiseaux par radar en mer est la sensibilité de ces derniers à la houle. En effet, pour détecter les oiseaux, les longueurs d'onde utilisées doivent être courtes (bande X par exemple) et les réglages doivent être poussés au maximum pour suivre des petites cibles. La surface de réflexion des vagues étant toujours plus importante que la surface d'un oiseau, le bruit généré par la houle (= bruit de mer) sera toujours supérieur aux échos d'oiseaux et entraîne de fait la production de faux-positifs qui doivent être filtrés.

Cette difficulté est une constante pour les radars qui émettent des ondes à la surface de la mer (par opposition aux radars verticaux) et n'est pas une spécificité de ce radar. La même difficulté est par exemple rencontrée pour les radars de sécurité maritime dans la détection de petites embarcations, mais de manière bien moins importante étant donnée la surface de réflexion des cibles recherchées.

La hauteur du radar par rapport au niveau de la mer (25 mètres) augmente par ailleurs l'effet de la houle sur le radar étant donné l'angle d'incidence plus élevé des trains d'ondes sur les vagues. La localisation du radar n'a pas pu être adaptée pour cette étude compte-tenu des contraintes d'installation figées. L'angle d'inclinaison du faisceau a été choisi de façon à garantir la détection des oiseaux, y compris ceux volant bas, proches de la surface de la mer.

Les précipitations ont le même effet sur le bruit généré dans les données, mais ont un impact moins important sur le suivi de déplacements d'oiseaux car les oiseaux volent en moyenne beaucoup moins sous les averses.

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et limites du système utilisé.

Avantages	Limites
Méthode inédite	Matériel nouveau, encore en phase de développement
Données de trajectoires en 3 dimensions (x, y, z)	Sensibilité importante au bruit de mer et à la pluie
Suivi en continu 7/24	Détection proportionnelle à la taille des cibles
Même probabilité de détection de jour et de nuit	Pas d'identification directe des espèces
Suivi à macro-échelle (rayon de 6 km)	Pas de détection de petits oiseaux volant seuls (ex : passereaux et espèces de petite taille)
Acquisition de données comportementales : vitesses, directions, altitudes de vol	Analyse de données complexe et chronophage

2.2.3.3 Acquisition des données

L'acquisition des données a débuté au 01/05/2021 et s'est terminée le 03/06/2022. Le radar a été désinstallé le 14/09/2022. Les données analysées dans ce rapport couvrent la période du 01/05/2021 au 30/04/2022 (12 mois).

Le radar a été paramétré pour fonctionner 7/7j et 24/24h.

Des interruptions liées à des problèmes d'alimentation électrique ont toutefois été enregistrées :

- Les 23 et 30 juin 2021 ;
- Du 6 au 20 juillet 2021 ;
- Du 21 août au 14 septembre 2021 ;
- Du 14 décembre 2021 au 26 janvier 2022.

D'autres périodes d'absence de données ont été rencontrées :

- Les 7, 8, 9, 19, 20, 29, 30 mai 2021 (problème de traitement doppler) ;
- Les 2, 4, 5, 6, 12, 13 juin 2021 (problème de traitement doppler, corrigé par un patch logiciel) ;
- Les 24, 25 juillet 2021 (problème d'acquisition des données) ;
- Les 25, 26 septembre 2021 (problème d'acquisition des données) ;
- Les 2, 3, 4, 5, 25, 26, 27 octobre 2021 (problème d'acquisition des données, résolu par un correctif apporté à l'algorithme de détection) ;
- Les 24 et 25 novembre (intervention sur le mât pour maintenance préventive), et 3 et 30 novembre (problème d'acquisition des données) ;

- Du 1^{er} au 8 décembre (problème d'acquisition des données, résolu par une intervention à distance sur le disque d'enregistrement des données)

Les longs arrêts de juillet, août et septembre dus aux problèmes d'alimentation externes au fonctionnement du radar ont entraîné des pertes d'informations sur les mouvements migratoires postnuptiaux, notamment précoces (juillet) et lors d'une période importante pour la migration des oiseaux marins (fin août – mi-septembre).

Le tableau suivant présente le taux de disponibilité des données par mois :

Mois d'enregistrement	Taux de disponibilité des données
Mai 2021	77%
Juin 2021	80%
Juillet 2021	48%
Août 2021	65%
Septembre 2021	47%
Octobre 2021	77%
Novembre 2021	90%
Décembre 2021	13%
Janvier 2022	23%
Février 2022	100%
Mars 2022	100%
Avril 2022	100%

Il est à noter qu'une fois les problèmes électriques résolus (fourniture d'une alimentation conforme aux spécifications du radar), le radar a fonctionné sans interruption avec un taux de disponibilité des données de 100%.

2.3 Traitement des données

Le radar produit des centaines de milliers de trajectoires qu'il faut pouvoir filtrer pour extraire les données d'intérêt (oiseaux). Parce qu'il est complexe de séparer objectivement les trajectoires d'oiseaux des trajectoires provoquées par le bruit (faux positifs), un ensemble de traitements a dû être effectué, incluant l'intégration de données météorologiques complémentaires ainsi qu'un processus de classification puis de sélection des trajectoires.

2.3.1 Préparation des données

2.3.1.1 Association des données de houle

Afin d'évaluer la qualité des données et leur exploitabilité en fonction des différentes conditions de houle rencontrées, toutes les trajectoires obtenues ont été associées à la **hauteur de houle significative ($h_{1/3}$ en mètres)** concomitante, arrondie par heure.

Pour la période du 1^{er} août 2021 au 31 décembre 2021, toute donnée acquise a été associée à une hauteur de houle provenant des mesures effectuées par une bouée météocéan (bouée sud) à environ 3 km à l'est du mât de mesures de Fécamp. La série temporelle des données de houle a été complétée (entre mai et juillet 2021 puis de janvier 2022 à avril 2022) avec les données archivées du CANDHIS¹ à proximité de la zone d'étude.

¹ <https://candhis.cerema.fr/>

2.3.1.2 Identification visuelle des trajectoires

Afin d'optimiser la sélection et la validation des trajectoires d'oiseaux parmi les trajectoires d'autre nature (ex : bateaux, bruit), une méthode par classification et apprentissage a été développée spécifiquement pour cette étude (cf. paragraphe suivant). Cette méthode requiert la préparation d'un échantillon de données « identifiées » servant de jeu d'apprentissage (construction du modèle) et de test (évaluation du pouvoir prédictif de ce modèle). Ainsi, pour chaque mois de données, un échantillon de trajectoires a été manuellement étiqueté en tant que : « bateaux », « oiseaux », « vagues », et « bruit divers » sur la base de leurs caractéristiques et de l'expérience de l'équipe en suivi d'oiseaux par radar en mer. Cette étape a été réalisée sur des données acquises en conditions de houle les plus favorables (minimales), de sorte que les trajectoires soient étiquetées lorsque la probabilité de mauvaise association (i.e. association d'un écho d'oiseau et d'un écho de vague au sein d'une même trajectoire) est la plus faible. Les caractéristiques de ces trajectoires (vitesse, surface de réflexion de l'objet, etc.) sont fournies comme entrée du processus d'apprentissage de la méthode.

2.3.2 Sélection des trajectoires

2.3.2.1 Classification des trajectoires

La méthode mise en œuvre pour catégoriser les trajectoires selon leur nature (oiseaux, bateaux, vagues, bruit divers) est celle de la classification par forêts aléatoires développée par Breiman (2001)². Elle a permis de classer les différents types de trajectoires en fonction d'un jeu de trajectoires préalablement identifié. Grâce à cette classification, toutes les trajectoires dont les caractéristiques propres (ex : vitesse, surface de réflexion de l'objet, etc.) diffèrent significativement des caractéristiques communes aux trajectoires d'oiseaux ne sont ensuite pas prises en compte dans les analyses.

Afin de limiter au maximum le nombre de faux-positifs résiduels et par principe de précaution, un filtre supplémentaire a été appliqué aux trajectoires classées en « oiseaux ». Celles dont les caractéristiques sont compatibles avec des trajectoires d'oiseaux du point de vue du modèle, mais peu probables d'un point de vue biologique (ex : vitesses très faibles ou très élevées) ont ainsi été écartées. Ce filtre correspond aux critères de sélection suivants :

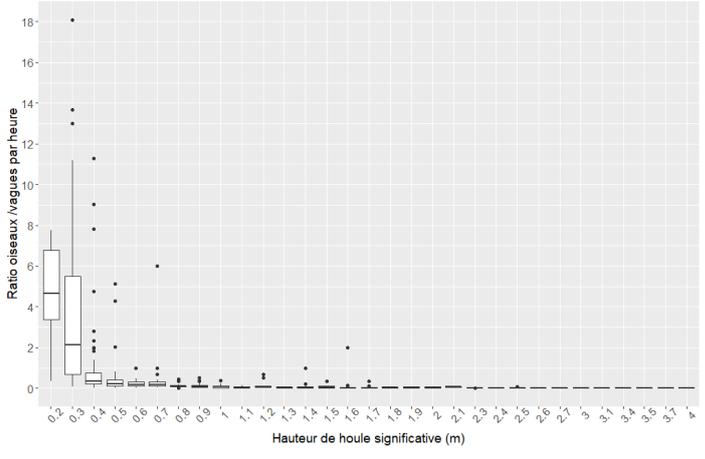
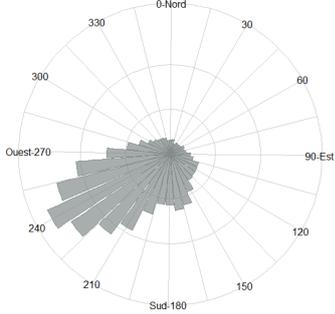
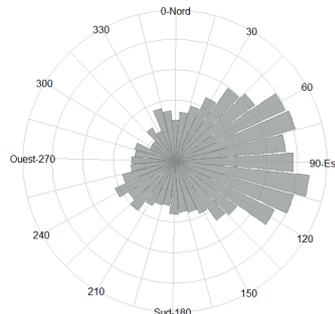
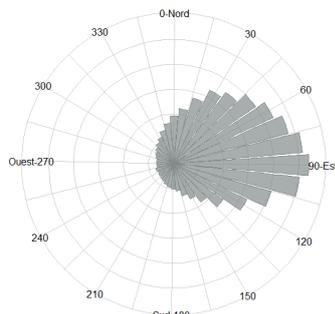
- vitesse horizontale moyenne de la trajectoire comprise entre 5 m.s⁻¹ et 25 m.s⁻¹ ;
- longueur supérieure à 200 m.

2.3.2.2 Sélection des conditions de houle favorables

L'exploitabilité des données est conditionnée par la hauteur de houle, qui, en augmentant, accentue la détection de faux positifs par le radar (trajectoires de vagues ou associations vagues/oiseaux). Au regard (i) du nombre de trajectoires réparties dans les classes « oiseaux » et « vagues » en fonction des conditions de houle, et (ii) des caractéristiques (directions notamment) de ces trajectoires (Tableau 1), seules les données acquises en conditions de houle inférieure à 0.7 m ont été considérées dans les analyses, les autres étant jugées trop bruitées pour représenter fidèlement les déplacements d'oiseaux en conditions de houle dégradées.

² BREIMAN, Leo. *Random forests. Machine learning*, 2001, vol. 45, no 1, p. 5-32.

Tableau 1: Illustration du processus de sélection des trajectoires selon le critère « hauteur de houle significative » - exemple d'Octobre 2021.

Représentations	Graphiques	Commentaires
<p>Distribution (boxplots) du ratio entre le nombre de trajectoires classées en « oiseaux » et le nombre de trajectoires classées en « vagues », par heure, et par classe de hauteur de houle.</p>		<p>La proportion de trajectoires de « vagues » par rapport à celles « d'oiseaux » augmente fortement à mesure que la hauteur de houle augmente (ratio de plus en plus faible). Au-delà de 0.7 m de hauteur de houle significative, les trajectoires de vagues sont très majoritaires. A ce stade, le choix méthodologique est d'explorer les caractéristiques des trajectoires d'oiseaux et de vagues au sein de différentes classes de hauteur de houle, afin d'évaluer la bonne distinction entre ces deux catégories à mesure que la hauteur de houle augmente.</p>
<p>Distribution des directions des trajectoires d'oiseaux lorsque la hauteur de houle significative est inférieure à 0.7 m.</p>		<p>Lorsque les conditions de houle sont inférieures à 0.7 m, la probabilité de fausses associations « oiseaux/vagues » au sein d'une même trajectoire est a priori faible. La distribution des directions d'oiseaux présente un mode autour de 240°.</p>
<p>Distribution des directions des trajectoires d'oiseaux lorsque la hauteur de houle significative est supérieure à 0.7 m.</p>		<p>Lorsque les conditions de houle sont supérieures à 0.7 m :</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) les directions des trajectoires d'oiseaux diffèrent de celles obtenues en conditions de houle plus favorables ; (ii) leur distribution se rapproche de celle des directions des vagues (mode autour de 90°) ; (iii) le nombre de trajectoires de vagues dépasse très largement le nombre de trajectoires d'oiseaux (cf. graphique ci-dessus).
<p>Distribution des directions des trajectoires de vagues lorsque la hauteur de houle significative est supérieure à 0.7 m.</p>		<p>La distinction des trajectoires de vagues et d'oiseaux est alors très complexe et engendre trop d'incertitude pour assurer une validation des trajectoires d'oiseaux.</p>
<p>A la suite de ces analyses, menées sur l'ensemble du jeu de données et au regard de différentes métriques, le seuil de hauteur de houle considéré comme favorable a été fixé à 0.7 m. Seuls les créneaux horaires présentant une valeur de $h_{1/3}$ inférieure à ce seuil ont été conservés pour produire les résultats présentés dans ce rapport.</p>		

Ainsi, la sélection des trajectoires selon le seuil de $h_{1/3} < 0.7$ m a été adoptée afin de :

- garantir la représentativité des **caractéristiques des trajectoires** d'oiseaux présentées dans le corps du rapport en minimisant les mauvaises associations de cibles au sein d'une même trajectoire et donc les faux-positifs ;
- éviter la sous/surestimation du **nombre de trajectoires** d'oiseaux par heure et par km² due aux mauvaises associations de cibles lorsque les conditions de houle se dégradent ;
- assurer une analyse des trajectoires portée sur des **conditions d'acquisition** relativement homogènes et **comparables** au cours des mois.

2.3.2.3 Echantillonnage des trajectoires

A mesure que l'on s'éloigne du radar, le type de trajectoires enregistrées est soumis à la combinaison de trois effets schématisés dans la Figure 2:

- la perte de détection, d'autant plus importante que les cibles sont de petite taille ;
- l'augmentation de l'altitude scannée en lien avec l'angle d'ouverture des antennes ;
- dans le cas particulier du suivi radar depuis le mât de Fécamp, une incertitude croissante sur les hauteurs de vol du fait de l'oscillation du mât (quelques degrés).

En conscience de ces limites, les analyses ont été menées sur un échantillon représentatif des trajectoires centrée sur la distance au radar présentant le maximum de détection pour permettre une analyse quantitative des résultats.

Cet échantillonnage permet de décrire de façon fiable l'activité aviaire dans une gamme d'altitude comprise entre 0 et 200 m, qui correspond par ailleurs à la zone d'intérêt dans le contexte du développement de l'éolien en mer. Géométriquement, les altitudes de vol les plus élevées sont enregistrées à plus grande distance du radar (e.g. plus de 1000 m d'altitude à plus de 3 km du radar), mais ne sont issues que de grandes cibles.

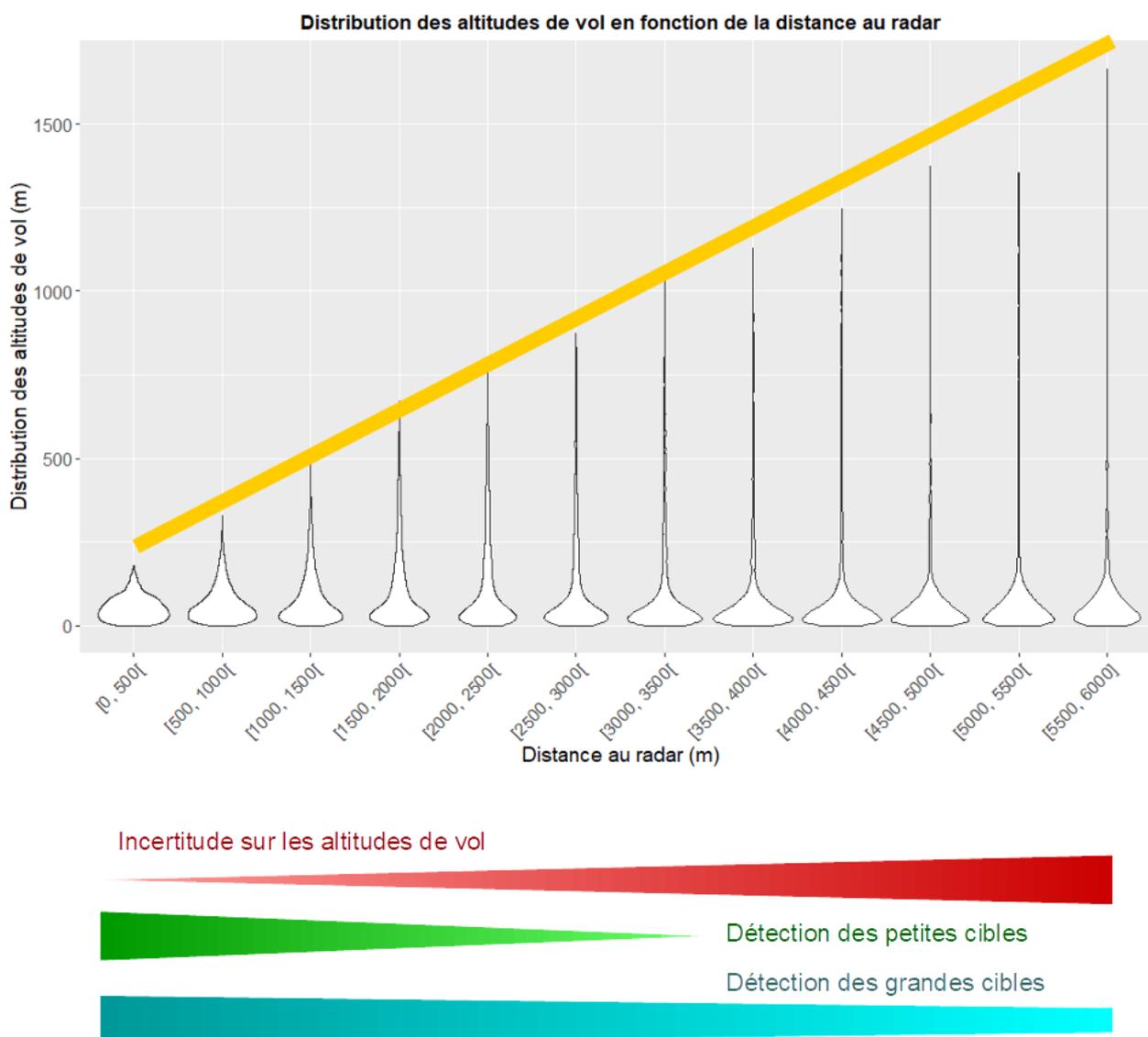


Figure 2: Illustration des différentes limites de détection et de l'incertitude sur les altitudes de vol, en fonction de la distance au radar. Le graphique (en gris) représente la distribution des altitudes de vol des trajectoires d'oiseaux issues du jeu de données sur 12 mois, et la ligne jaune la limite supérieure de la détection.

2.4 Disponibilité des données en fonction de la hauteur de houle

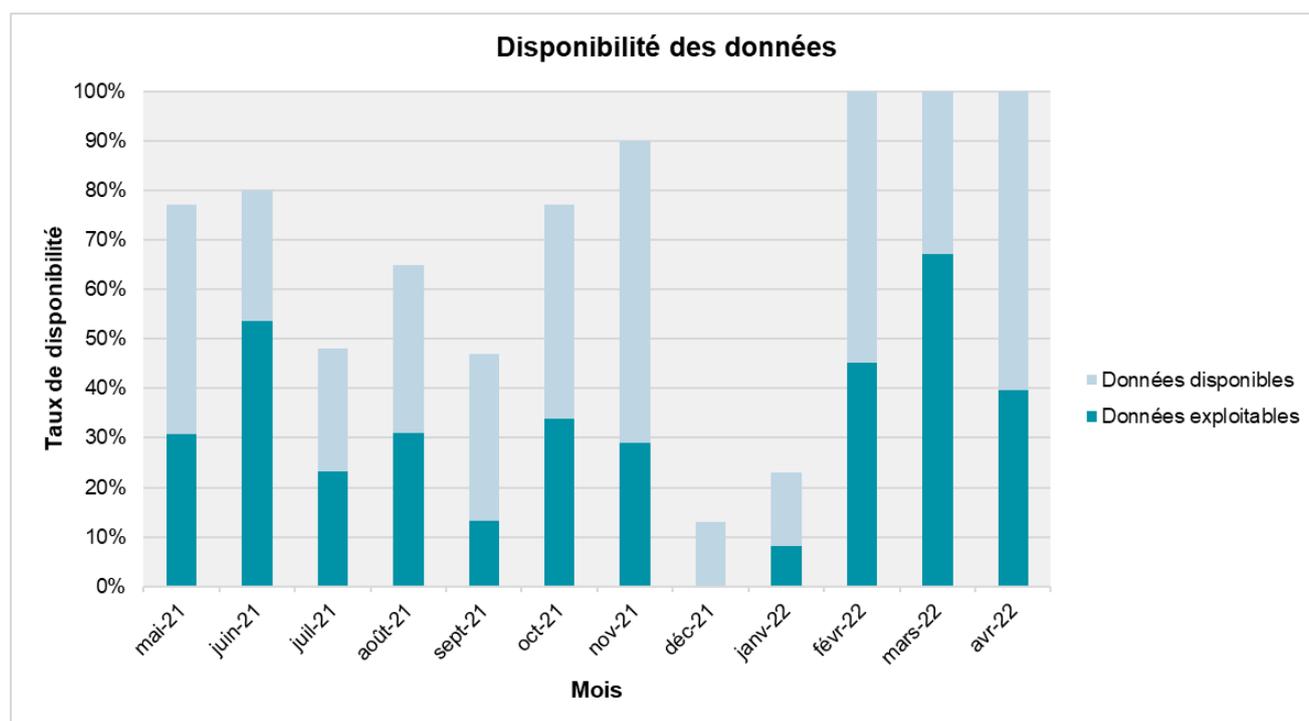
Comme présenté dans le paragraphe 2.3.2.2, ($h_{1/3}$ en mètres), n'ont été conservés que les créneaux horaires pour lesquels la hauteur de houle significative $h_{1/3}$ était inférieure à 0.7 m.

Le nombre de créneaux horaires aux conditions de houle favorables pour l'exploitation des données varie selon les mois :

- en décembre 2021, aucun créneau horaire n'a permis l'acquisition de données en conditions de houle favorables, notamment du fait de l'arrêt prolongé du radar ; ce mois est donc exclu des analyses ;
- au cours des autres mois, le nombre moyen de créneaux horaires favorables atteint 247.5 h (écart-type ± 123.7 h), avec un minimum en janvier 2022 (61 h) et un maximum en mars 2022 (499 h).

Mois	2021								2022			
	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril
Nombre d'heures d'acquisition en bonnes conditions de houle ($h_{1/3} < 0.7$ m)	229	386	172	230	95	252	208	0	61	304	499	286

Bien que le nombre d'heures varie d'un mois à l'autre, la pression d'observation associée est exceptionnelle et unique pour le suivi d'oiseaux en mer (à titre comparatif, un suivi par bateau de 6h, réalisé tous les mois pendant un an, représente 72h de pression d'observation sur l'ensemble de la surface couverte par les transects).



3 Résultats

3.1 Phénologie mensuelle

Le graphique suivant présente l'évolution de l'activité moyenne horaire de vols d'oiseaux par km², de jour et de nuit. Pour rappel, une trajectoire peut représenter un déplacement migratoire ou un vol local, d'un oiseau de taille moyenne à grande volant seul ou d'un vol groupé de petits oiseaux.

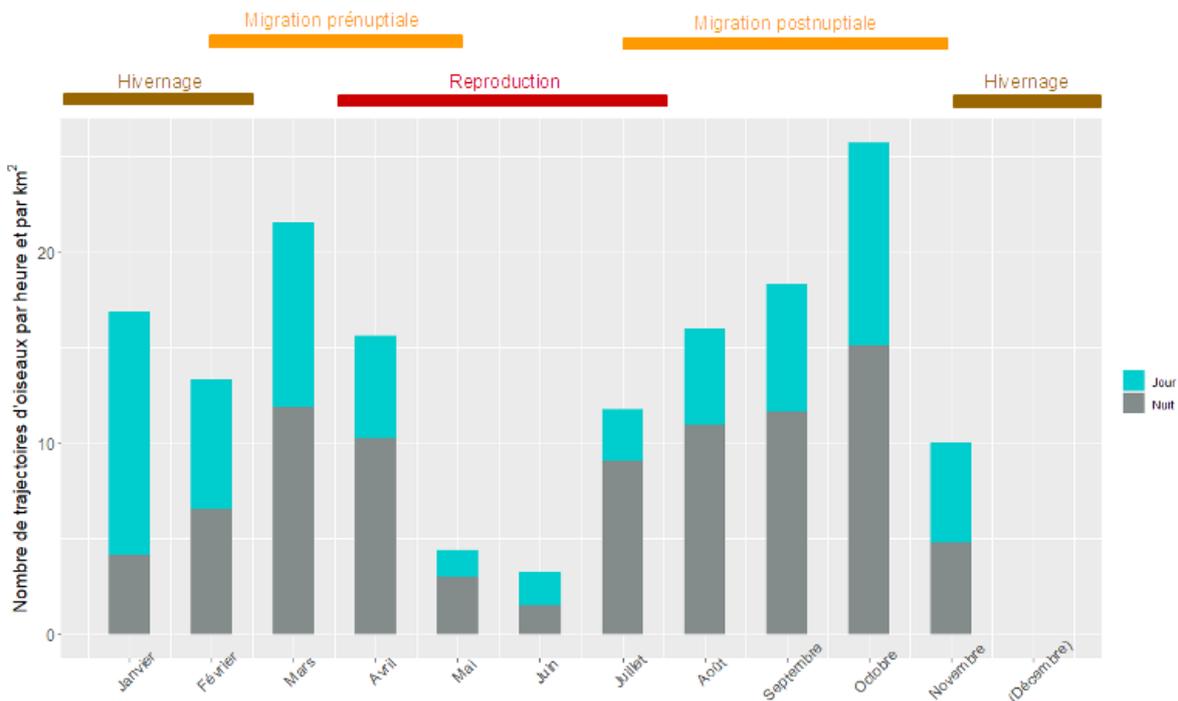


Figure 3: Nombre moyen mensuel de trajectoires par heure et par km². Le mois de décembre a été écarté des analyses du fait de l'absence de données en conditions de houle favorables.

3.2 Phénologie horaire

Les graphiques suivants présentent la distribution horaire de l'activité de vol des oiseaux enregistrée (nombre de trajectoires par heure et par km²) durant les 12 mois analysés. L'activité horaire a été corrigée par le nombre de créneaux horaires disponibles en conditions de houle favorables.

Les heures sont données en temps universel (UTC), unité principalement utilisée dans ce type d'étude pour s'affranchir notamment des problèmes liés aux changements d'heures. Du 28 mars au 31 octobre il faut ainsi ajouter 2 heures pour avoir l'heure locale (10h UTC = 12h heure locale), et en-dehors de ce créneau il faut ajouter 1 heure (10h UTC = 11h heure locale).

3.2.1 Mai

En mai deux types d'activité se superposent : migration et mouvements locaux. La migration est visible par le pic de début de nuit (20-23h UTC) et par l'activité en fin de nuit. Cette activité se poursuit quelques heures après le lever du soleil et concerne probablement à la fois des migrateurs et des oiseaux locaux. L'activité baisse ensuite continuellement jusqu'à 10h (UTC) puis remonte jusqu'à un second pic observé en milieu d'après-midi (14-16h UTC), pour diminuer à nouveau jusqu'à la nuit.

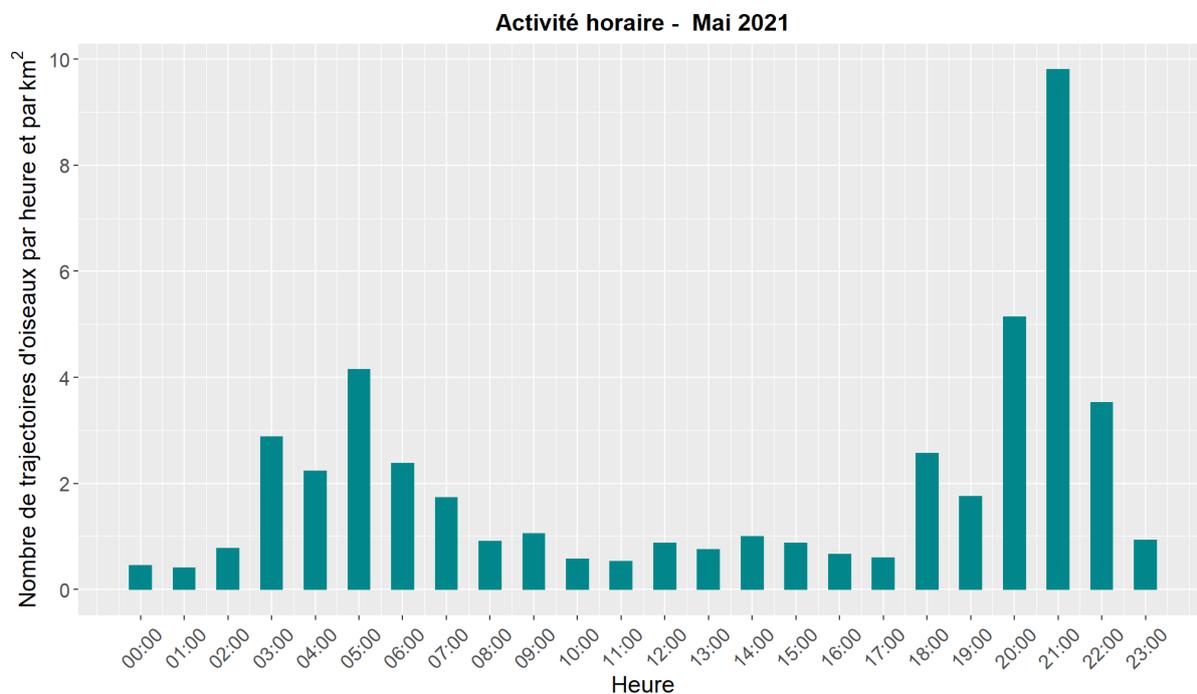


Figure 4: Activité horaire enregistrée pour le mois de Mai 2021 (heure UTC).

3.2.2 Juin

En juin, l'activité se concentre du lever du jour à 13h UTC, puis diminue dans l'après-midi avant une reprise en fin de jour. Cette phénologie est représentative de mouvements principalement locaux.

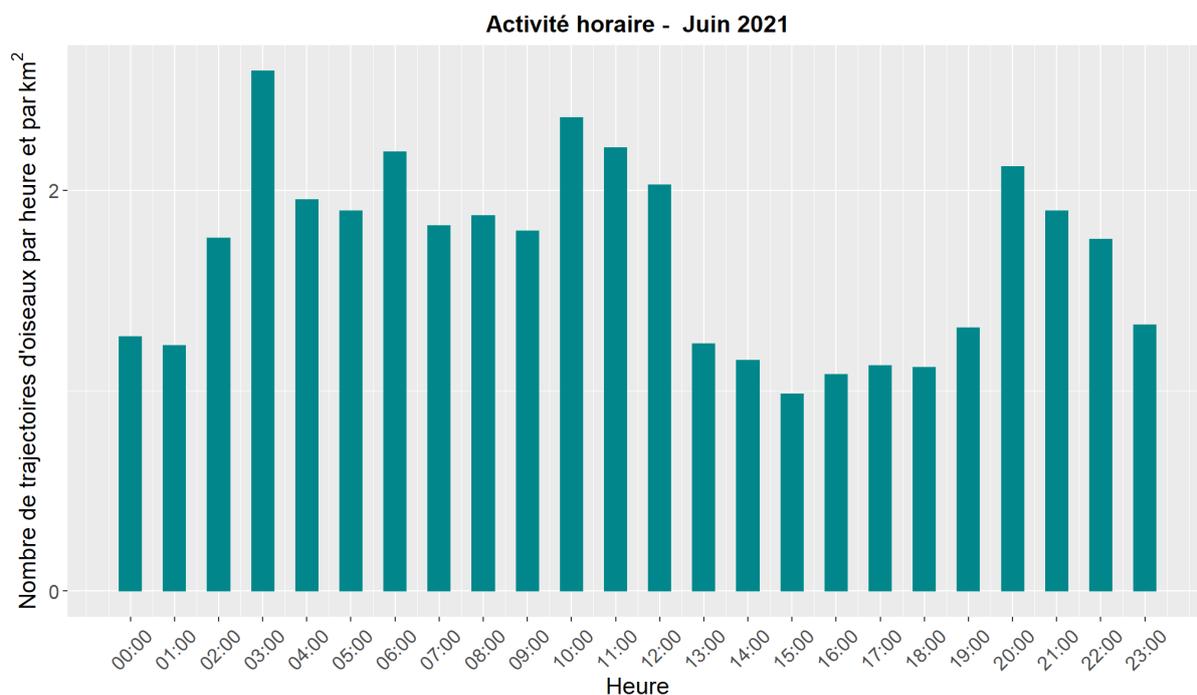


Figure 5: Activité horaire enregistrée pour le mois de Juin 2021 (heure UTC).

3.2.3 Juillet

Le graphique suivant indique une reprise des mouvements migratoires, avec un flux plus important la nuit. Le mois de juillet est habituellement un mois de transition entre les mouvements locaux des individus finissant leur reproduction, et les premiers mouvements migratoires postnuptiaux. Le graphique est essentiellement basé sur des données de la dernière décade de juillet (radar non alimenté ou conditions de houle défavorables en dehors de cette plage) ce qui explique l'importance des mouvements migratoires, qui sont d'autant plus importants avec l'avancement dans le mois.

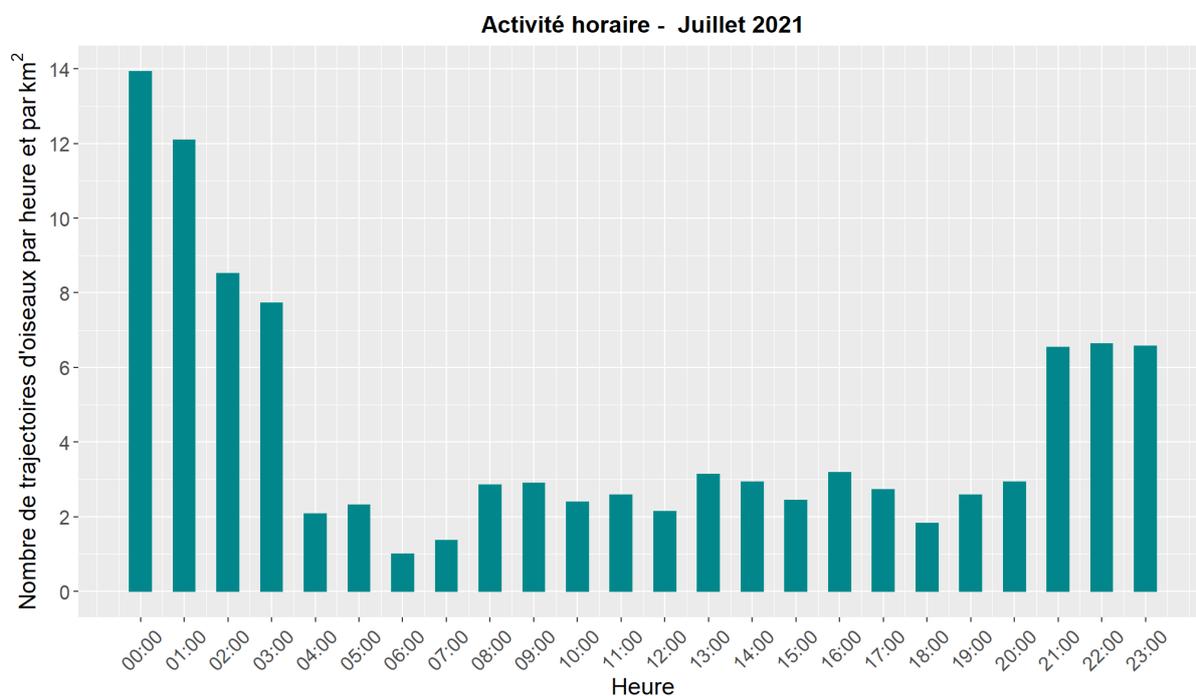


Figure 6: Activité horaire enregistrée pour le mois de Juillet 2021 (heure UTC).

3.2.4 Août

Le mois d'août suit la tendance de juillet, avec une migration nocturne nette entre 21h et 4h UTC.

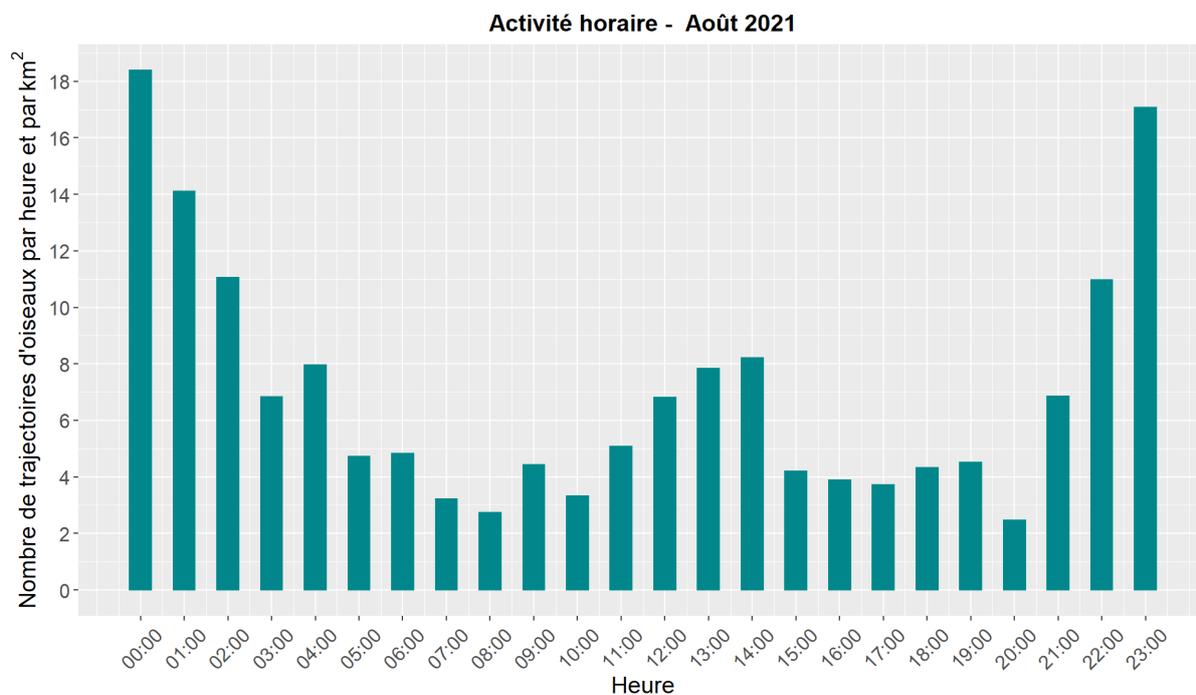


Figure 7: Activité horaire enregistrée pour le mois de Août 2021 (heure UTC).

3.2.5 Septembre

En septembre, en plus de l'activité nocturne migratoire, deux pics d'activité sont enregistrés aux premières et dernières heures de la journée. Les déplacements aux levés et couchers peuvent concerner à la fois des oiseaux migrateurs et des oiseaux locaux.

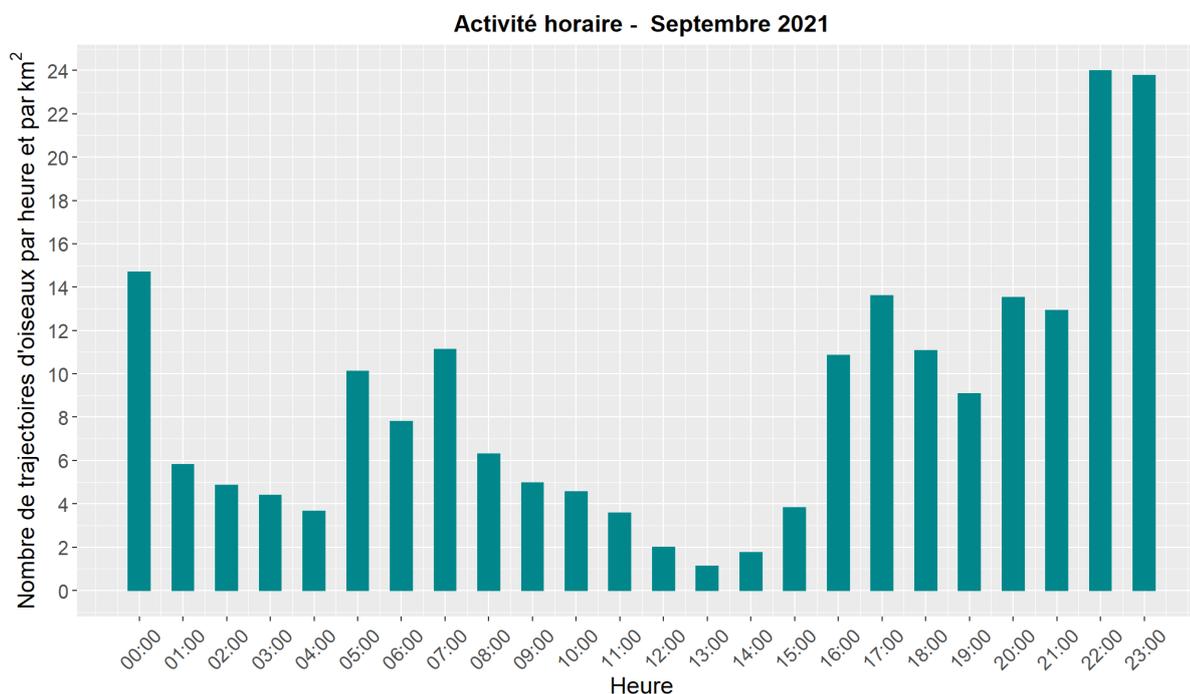


Figure 8: Activité horaire enregistrée pour le mois de Septembre 2021 (heure UTC).

3.2.6 Octobre

L'évolution horaire de l'activité d'octobre suit celle de septembre, avec toutefois l'absence du pic d'activité en fin de journée. C'est au cours de ce mois que le flux moyen a été maximal, avec près de 30 trajectoires/h/km² entre 00h et 01h UTC.

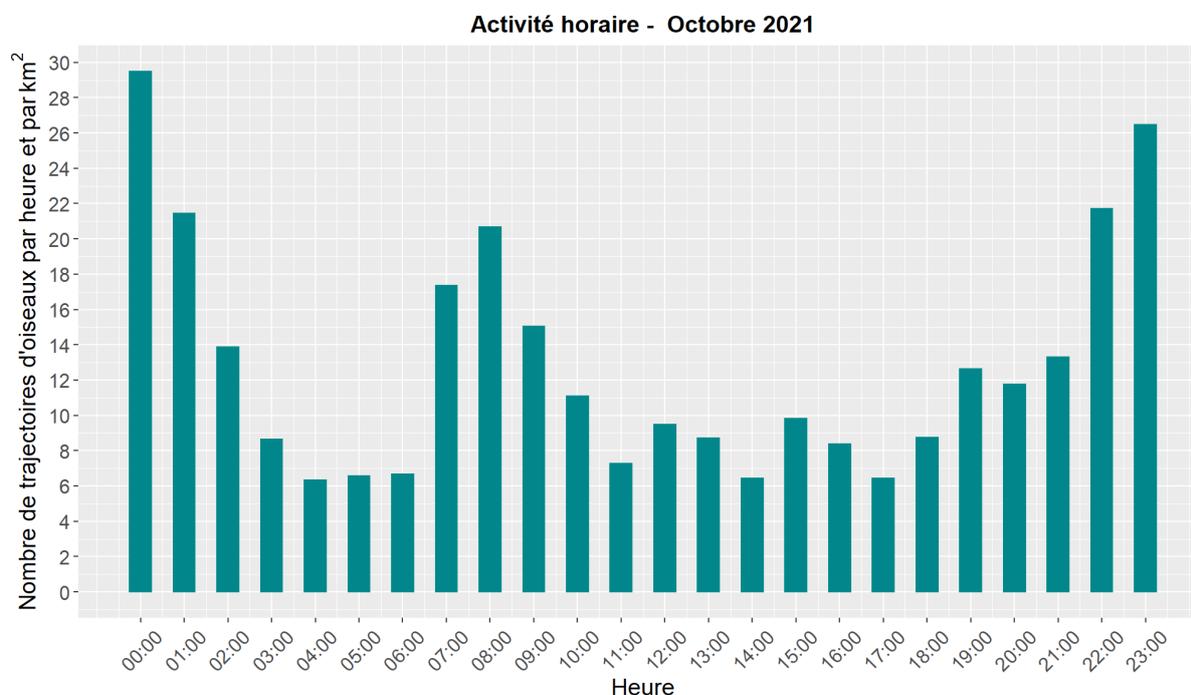


Figure 9: Activité horaire enregistrée pour le mois d'Octobre 2021 (heure UTC).

3.2.7 Novembre

En novembre les flux nocturnes diminuent mais restent encore bien visibles. De jour, l'activité de vol se concentre entre 07h et 13h UTC. Cette évolution montre la transition entre la fin de la période de migration postnuptiale et le début de l'hivernage.

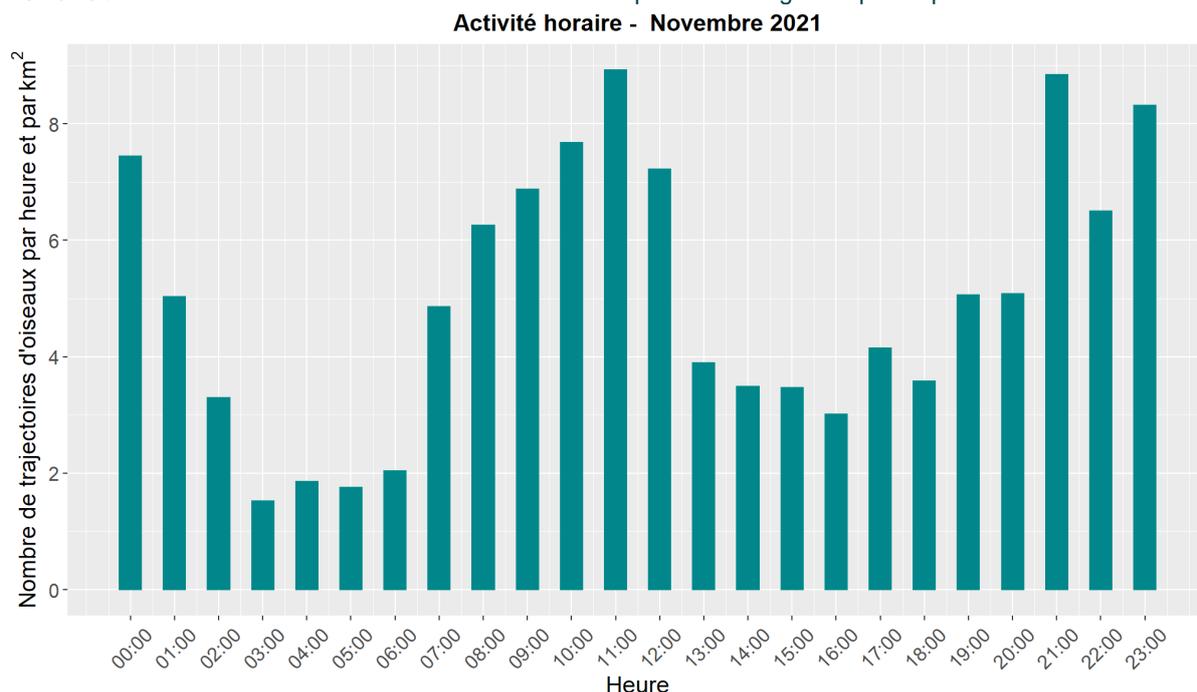


Figure 10: Activité horaire enregistrée pour le mois de Novembre 2021 (heure UTC).

3.2.8 Janvier

L'activité de janvier est nettement différente des autres mois, et représente l'activité classique des oiseaux en hiver, avec notamment très peu de mouvements nocturnes. L'activité de vol se concentre essentiellement en début de journée.

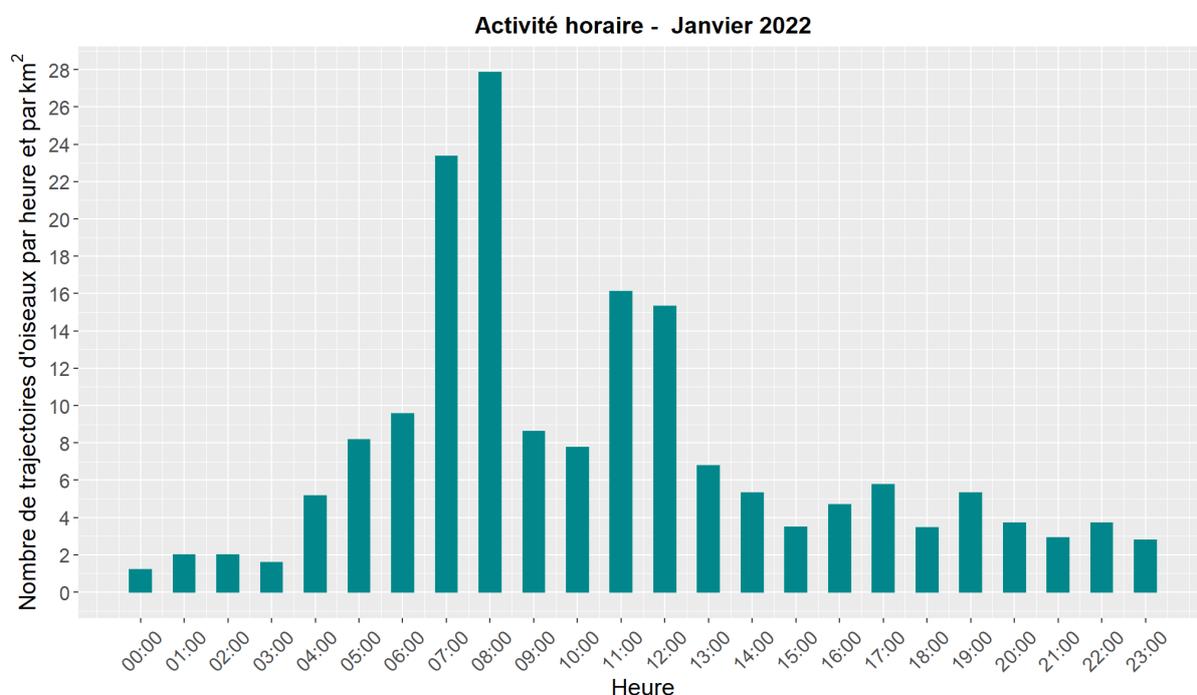


Figure 11: Activité horaire enregistrée pour le mois de Janvier 2022 (heure UTC).

3.2.9 Février

Comme pour mai, juillet et novembre, février est un mois de transition entre deux périodes du cycle biologique des oiseaux (ici entre l'hivernage et la migration prénuptiale). Le graphique illustre cette évolution, avec une augmentation nette des déplacements nocturnes. Les oiseaux étant habituellement plus actifs en matinée, il est donc étonnant de noter que l'activité diurne en février se concentre en deuxième partie de journée, contrairement à janvier.

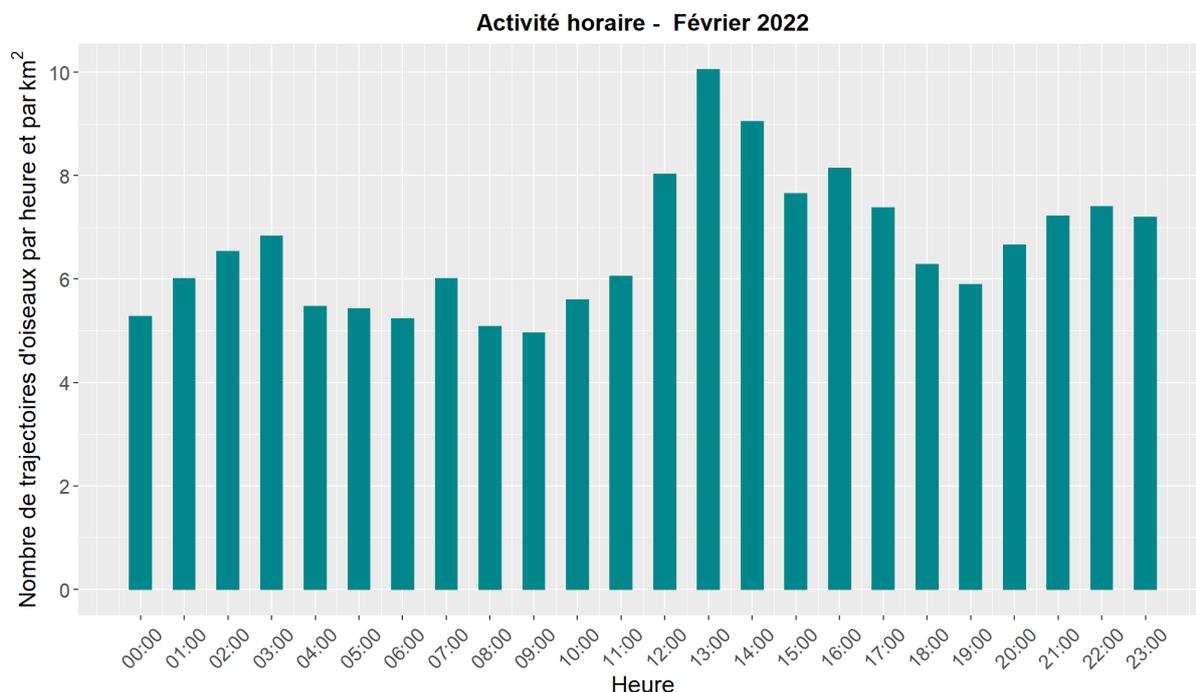


Figure 12: Activité horaire enregistrée pour le mois de Février 2022 (heure UTC).

3.2.10 Mars

La phénologie horaire du mois de mars indique une nette reprise de l'activité migratoire, avec une importante augmentation des déplacements nocturnes.

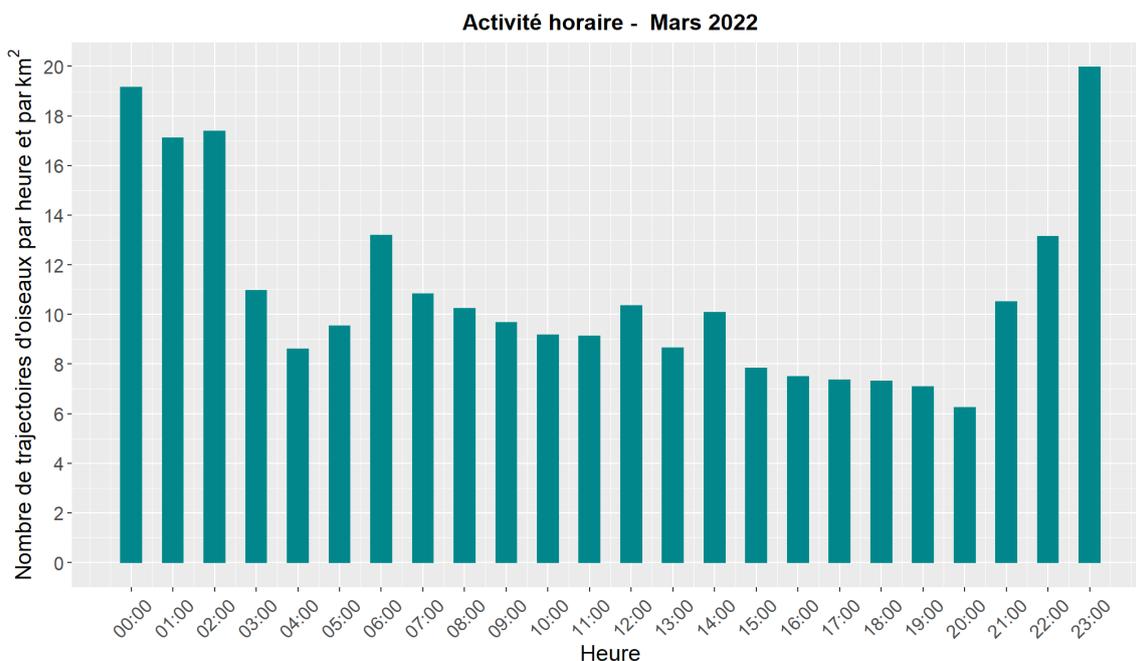


Figure 13: Activité horaire enregistrée pour le mois de Mars 2022 (heure UTC).

3.2.11 Avril

En avril, la migration bat son plein et l'activité se concentre de nuit, le matin, et en fin de journée.

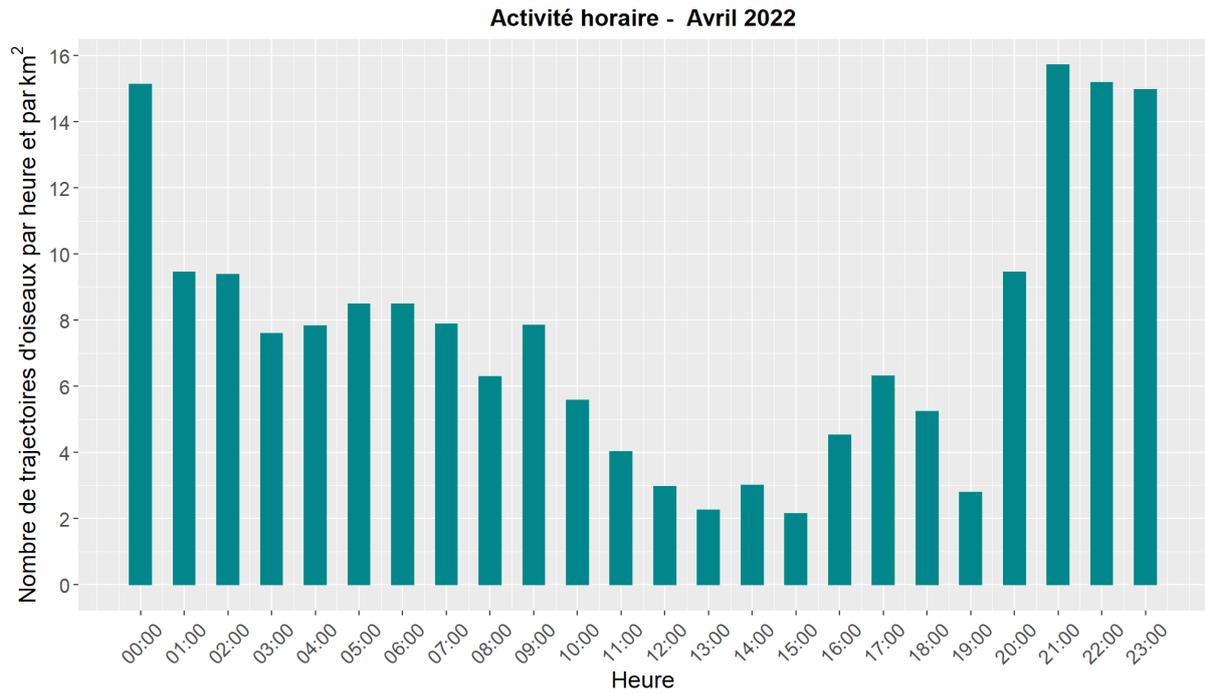


Figure 14: Activité horaire enregistrée pour le mois d'Avril 2022 (heure UTC).

3.3 Directions de vol

Les graphiques suivants présentent la distribution mensuelle des directions de vol, et distinctement de jour et de nuit. Les pourcentages correspondent à la proportion de trajectoires par classes de 10°. La distribution des directions de vol est indépendante de l'occultation du faisceau lié au mât.

3.3.1 Mai

En mai, les trajectoires de jour sont principalement orientées vers le quart nord-est, ce qui est cohérent avec la période et les mouvements migratoires associés et connus (migration pré-nuptiale, oiseaux en direction de l'Europe du nord et de l'est).

De nuit, les directions sont nettement différentes et sont orientées vers le nord-nord-ouest. Ce résultat, inédit, démontre les mouvements migratoires d'oiseaux en direction des îles britanniques, qui coupent au plus court et perpendiculairement la Manche.

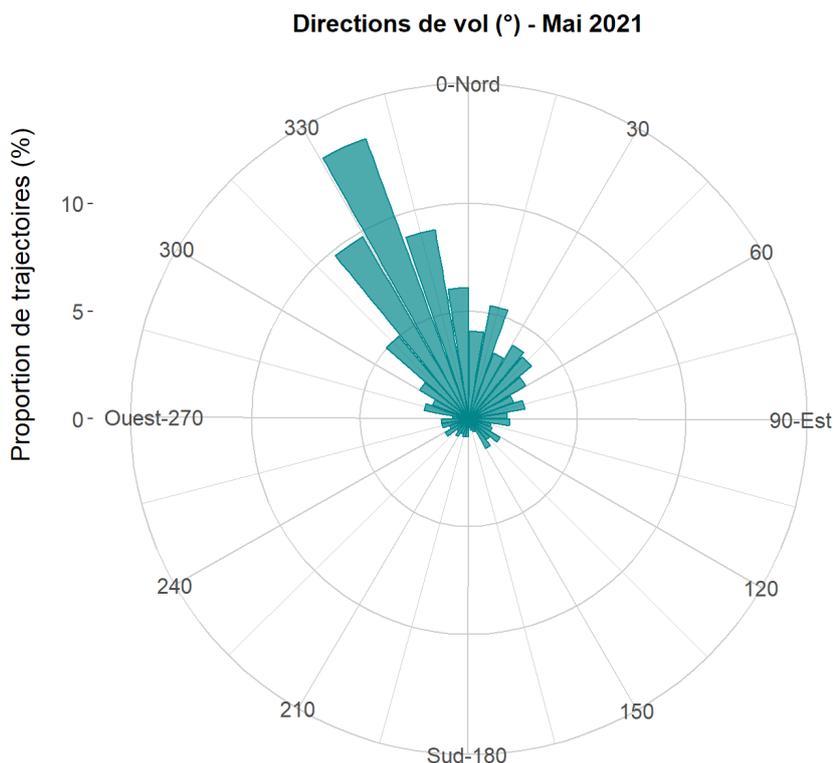


Figure 15: Distribution des directions de vol obtenues en Mai 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Mai 2021

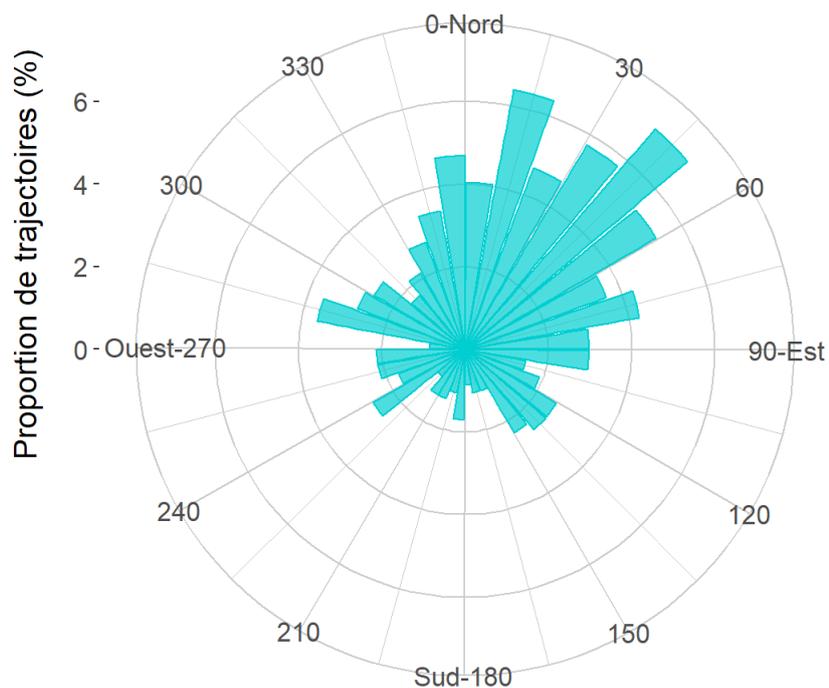


Figure 16: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Mai 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Mai 2021

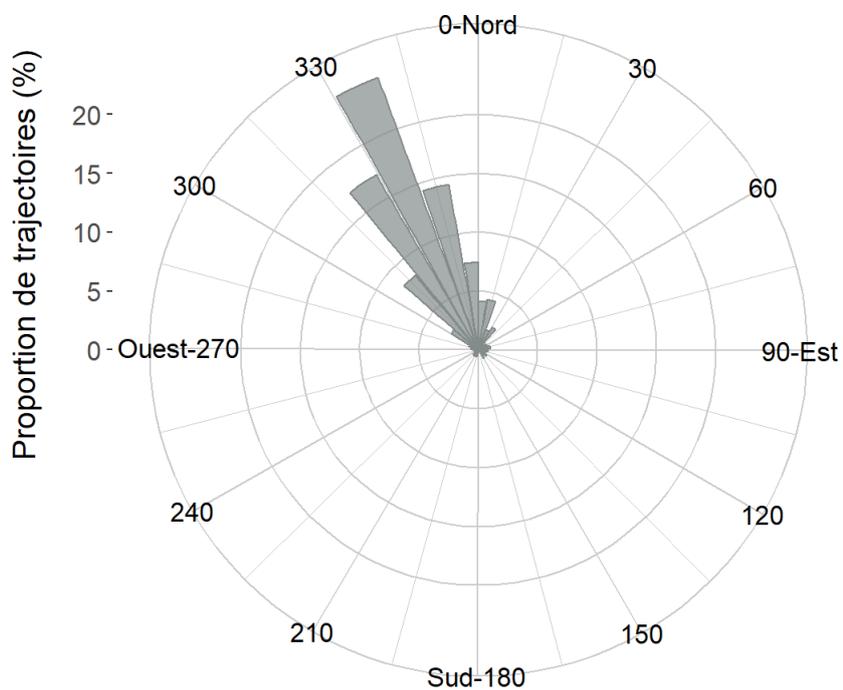


Figure 17: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Mai 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.2 Juin

En juin, la répartition des trajectoires est plus homogène, avec des concentrations toutefois plus importantes vers le nord-ouest et le sud-est (i.e. perpendiculaires à la côte), concernant plutôt des mouvements pendulaires côte-large.

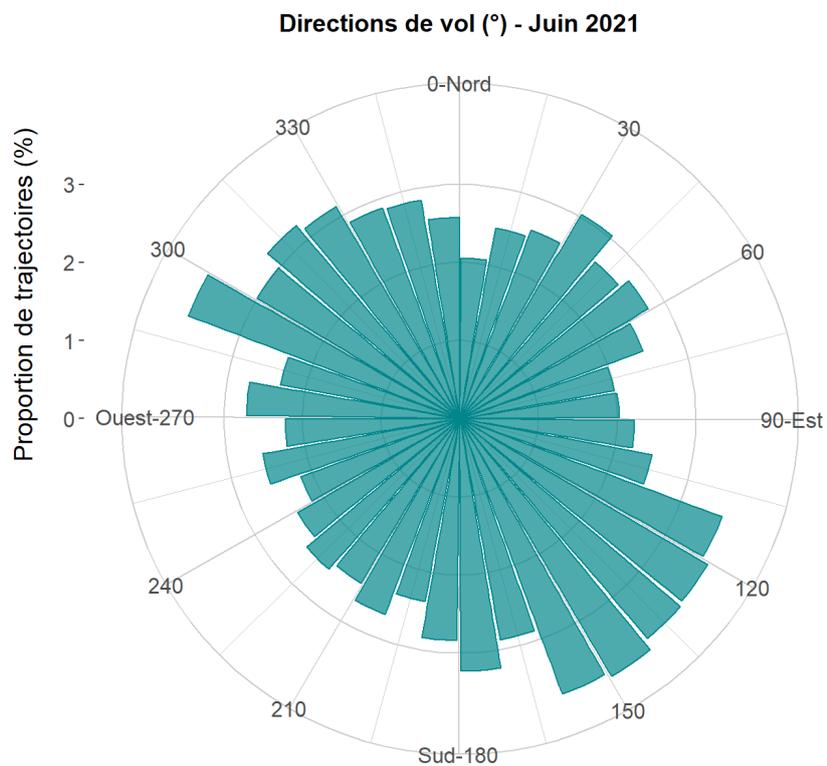


Figure 18: Distribution des directions de vol obtenues en Juin 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Juin 2021

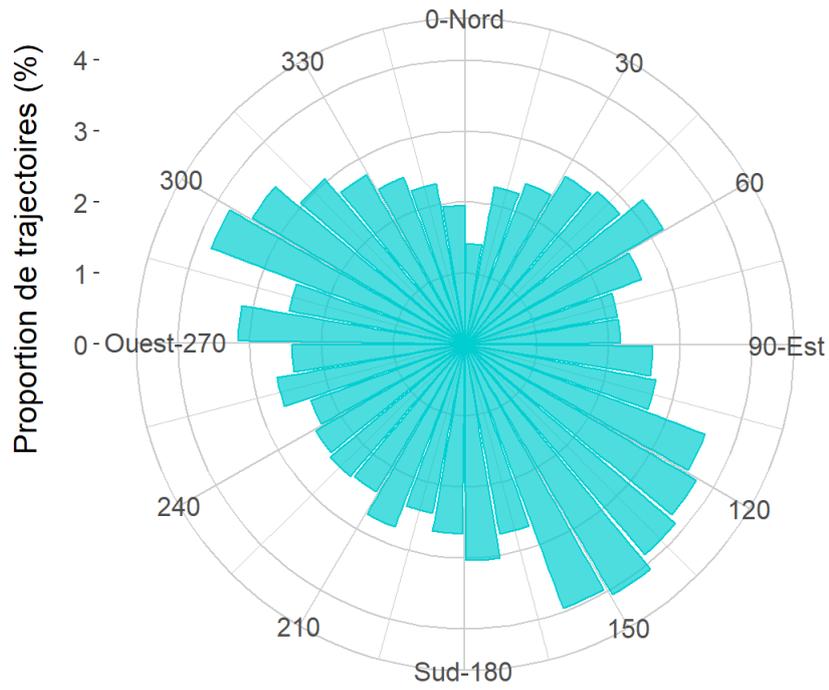


Figure 19: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Juin 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Juin 2021

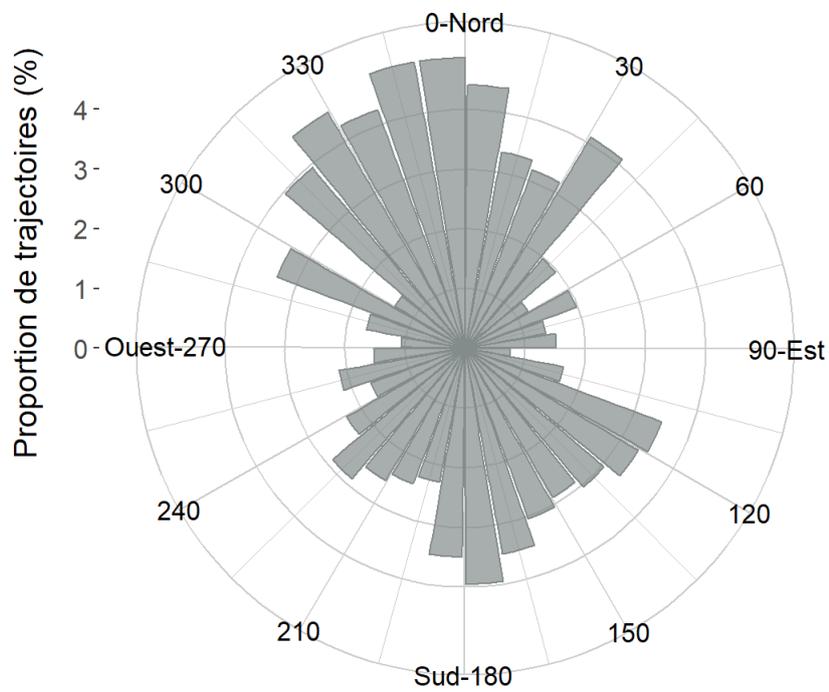


Figure 20: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Juin 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.3 Juillet

En juillet, les directions de vol sont réparties de manière homogène au cours de la journée, avec une légère sur-représentation des vols vers le sud. De nuit, les vols principalement orientés vers le sud-ouest et indiquent le début de la migration postnuptiale.

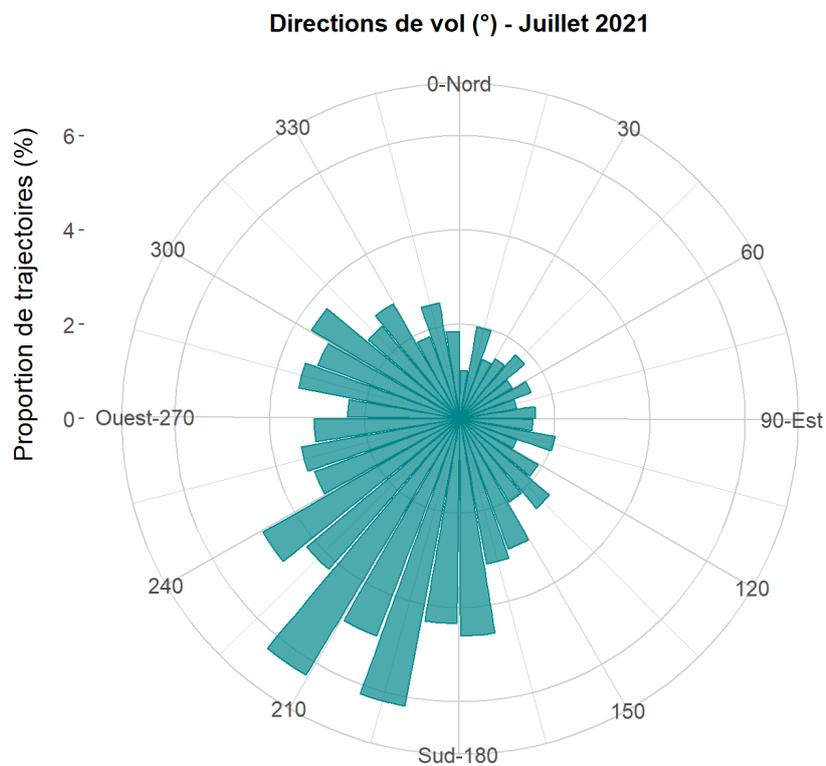


Figure 21: Distribution des directions de vol obtenues en Juillet 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Juillet 2021

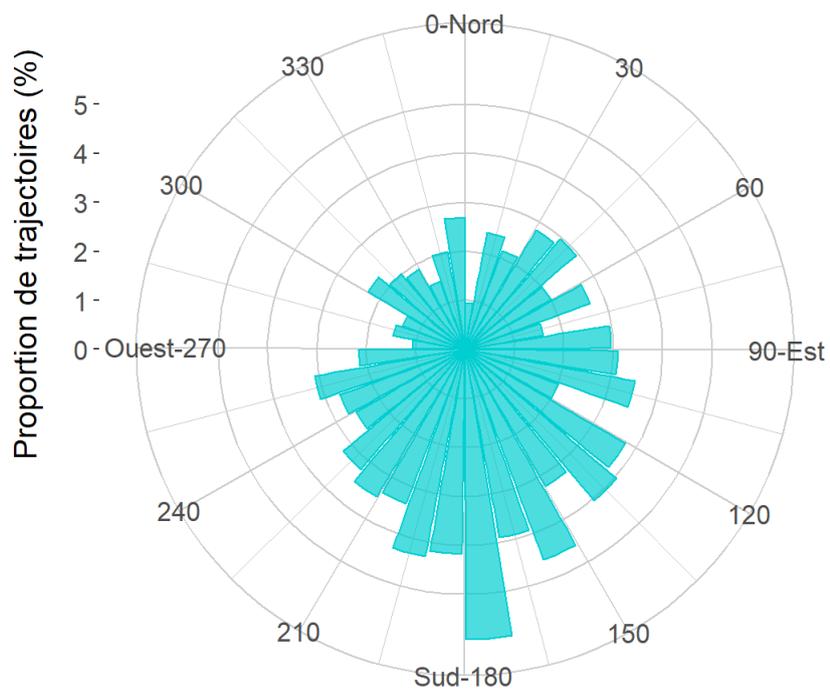


Figure 22: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Juillet 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Juillet 2021

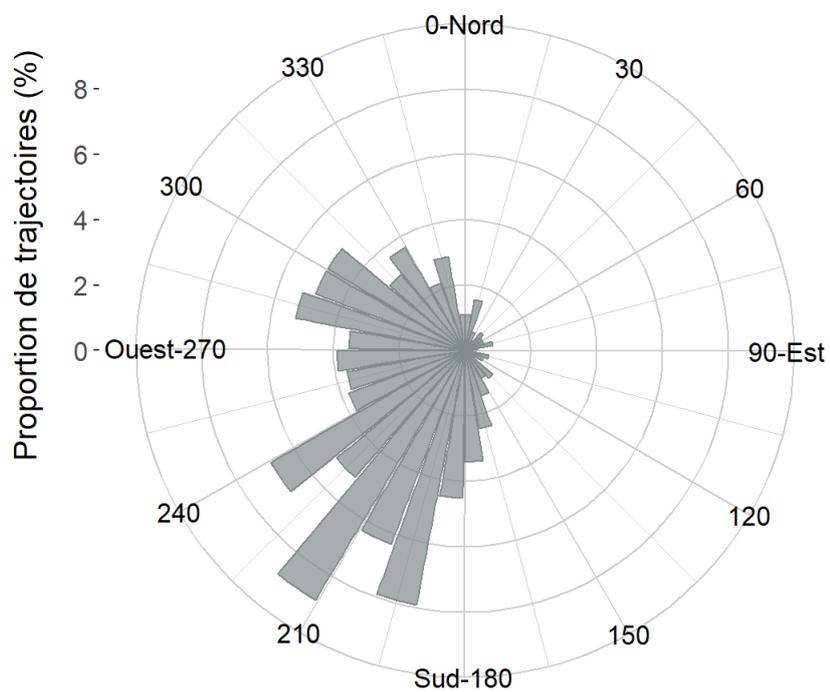


Figure 23: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Juillet 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.4 Août

En août, les directions de vol de nuit sont nettement orientées vers le sud et pourraient correspondre à des mouvements migratoires diurnes.

De nuit les directions sont nettement orientées vers le sud-sud-est, et diamétralement opposées aux directions observées en migration prénuptiale. Cette donnée renforce l'importance de cet axe nord-nord-ouest / sud-sud-est pour la migration sur ce secteur de la Manche. Même si les connaissances actuelles font état de migrateurs traversant la Manche pour aller dans les îles britanniques et plus au nord, les résultats fournis par le radar sont inédits car leur phénologie et directions de vol n'étaient pas clairement documentées jusqu'à présent.

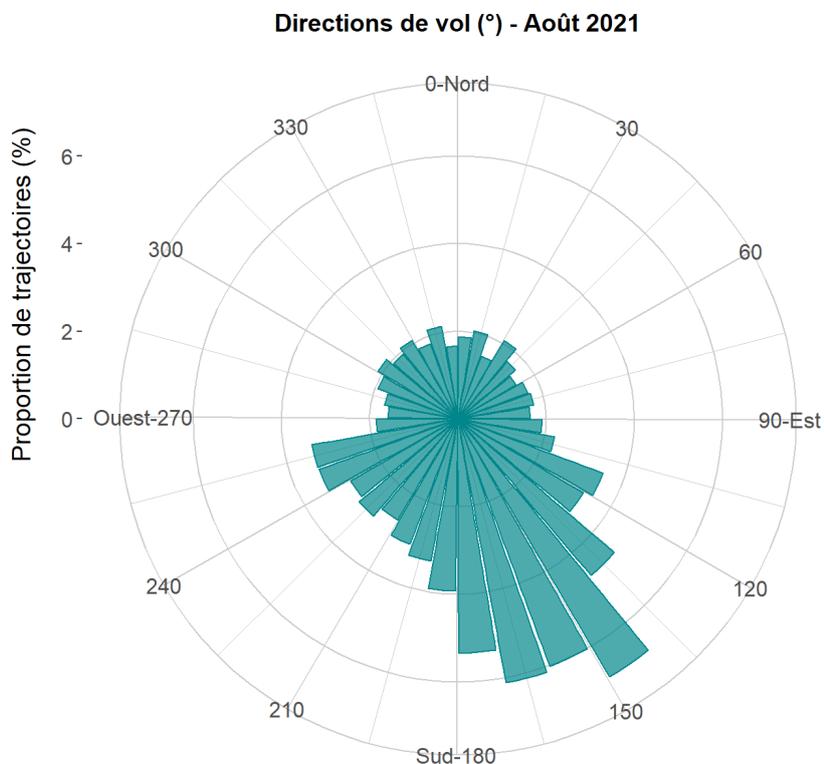


Figure 24: Distribution des directions de vol obtenues en Août 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Août 2021

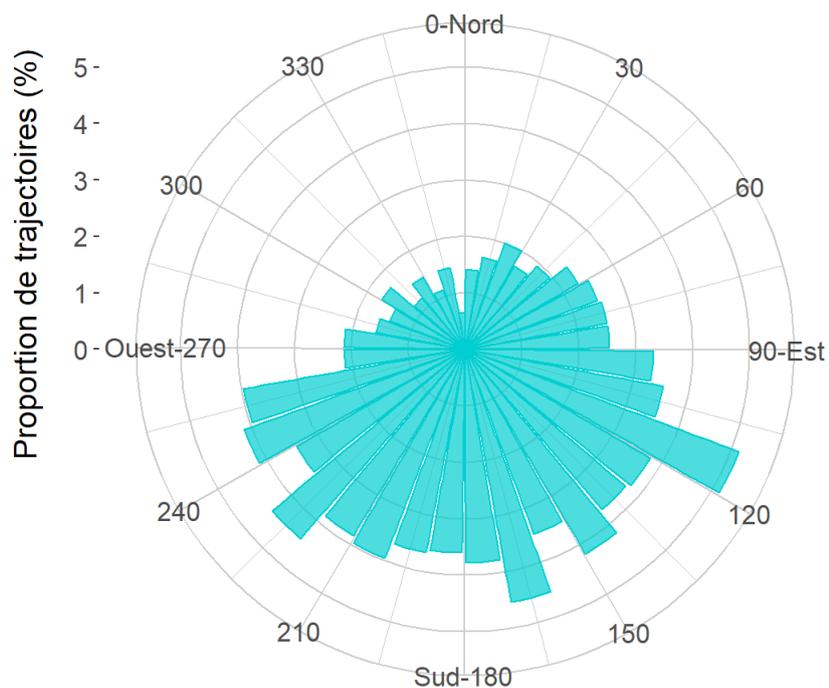


Figure 25: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Août 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Août 2021

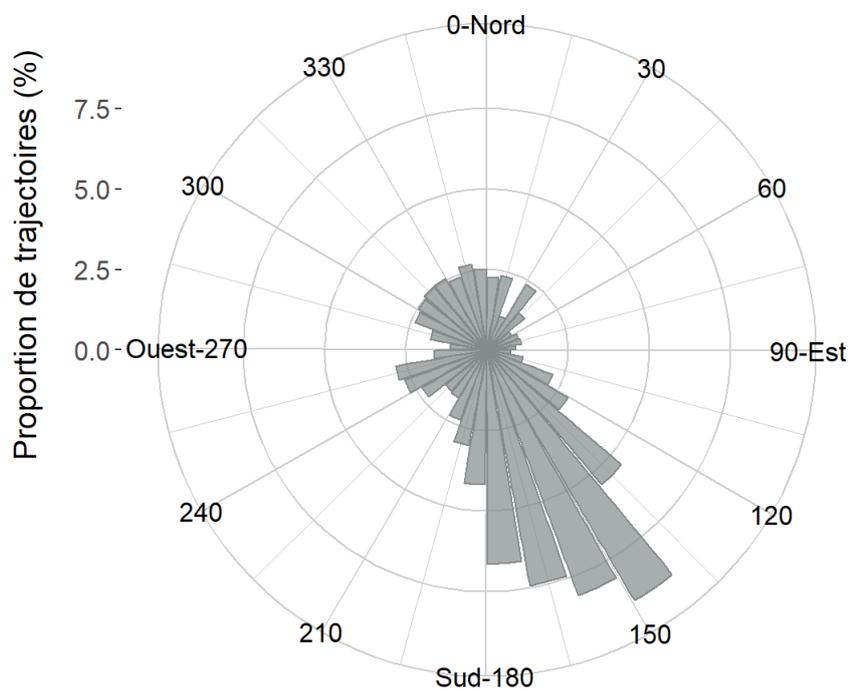


Figure 26: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Août 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.5 Septembre

En septembre, les directions de vol diurnes restent orientées vers le sud comme pour août. Les mouvements nocturnes changent cependant nettement de direction, avec une orientation principalement ouest-sud-ouest (parallèlement à la côte). Une faible proportion des vols en direction du sud-sud-est, comme en août, reste visible.

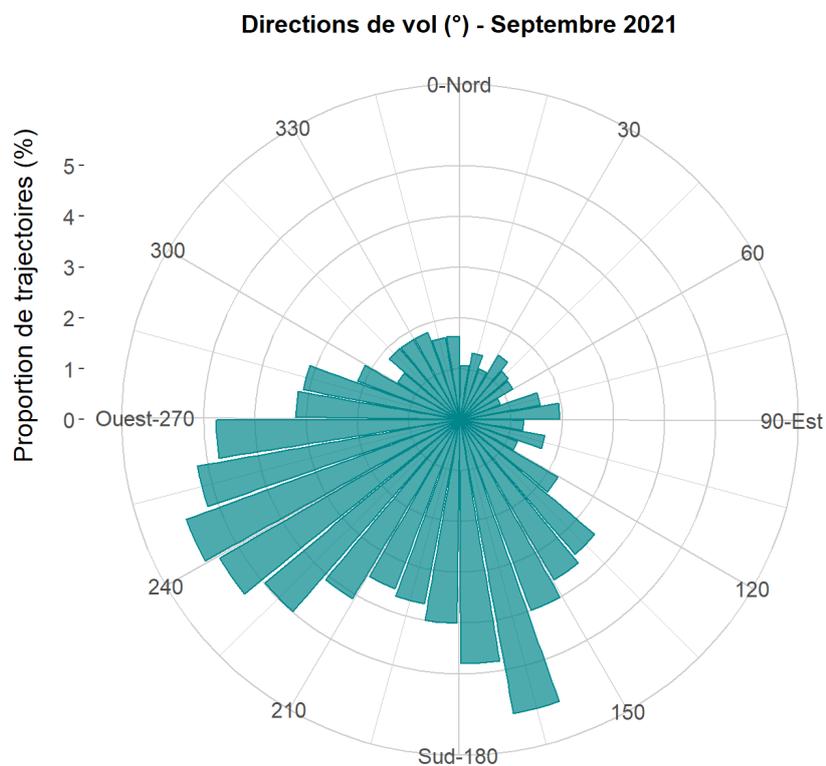


Figure 27: Distribution des directions de vol obtenues en Septembre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Septembre 2021

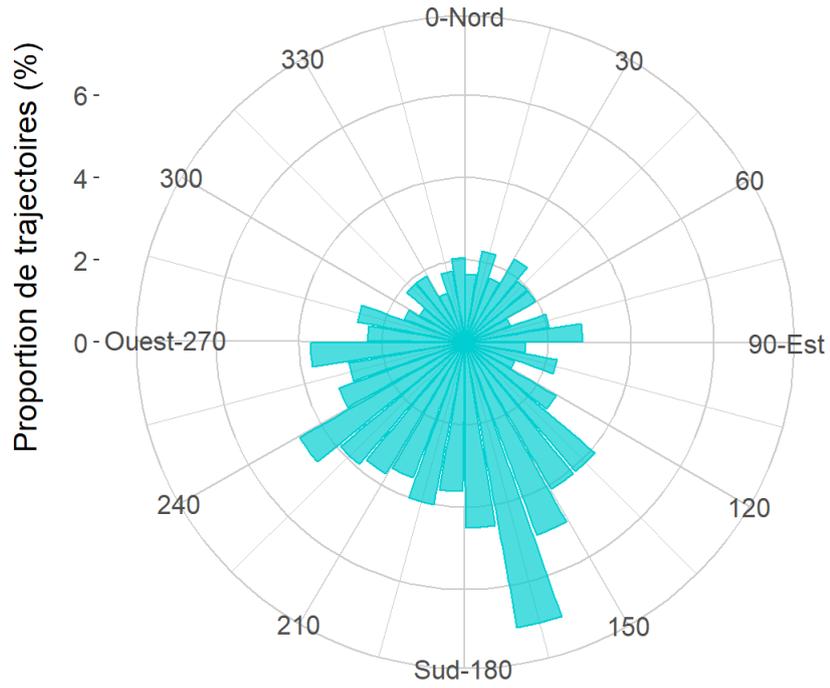


Figure 28: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Septembre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Septembre 2021

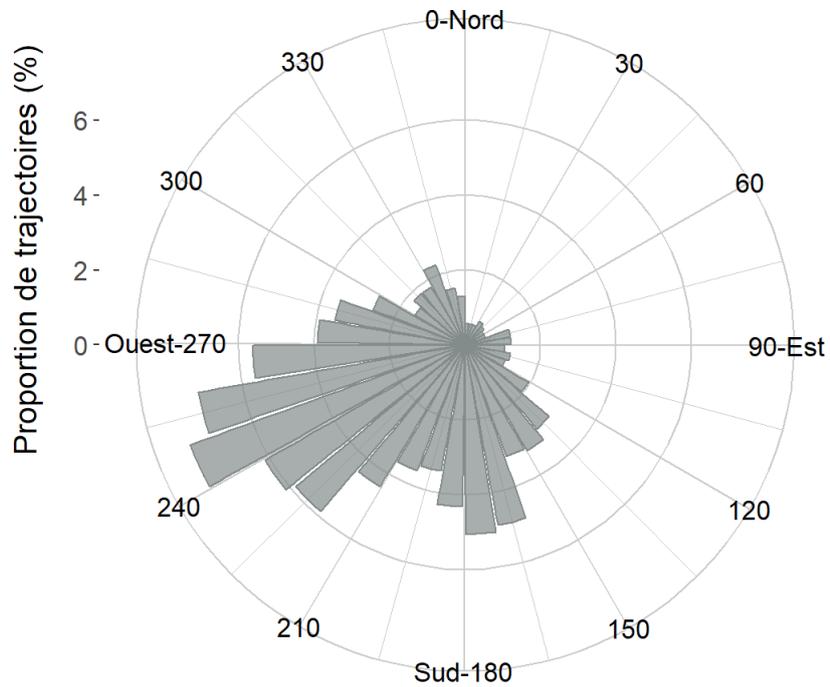


Figure 29: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Septembre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.6 Octobre

Les directions de vol d'octobre sont principalement orientées vers le sud-ouest et le sud-sud-est de jour. De nuit, la direction prise en septembre s'accroît, avec la majorité des trajectoires enregistrées vers l'ouest-sud-ouest.

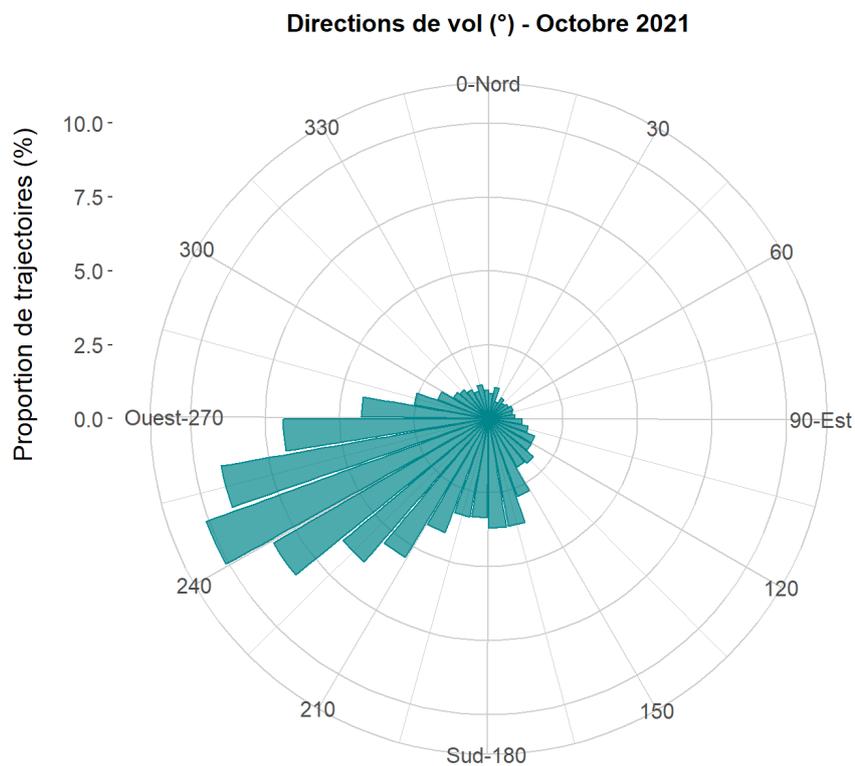


Figure 30: Distribution des directions de vol obtenues en Octobre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Octobre 2021

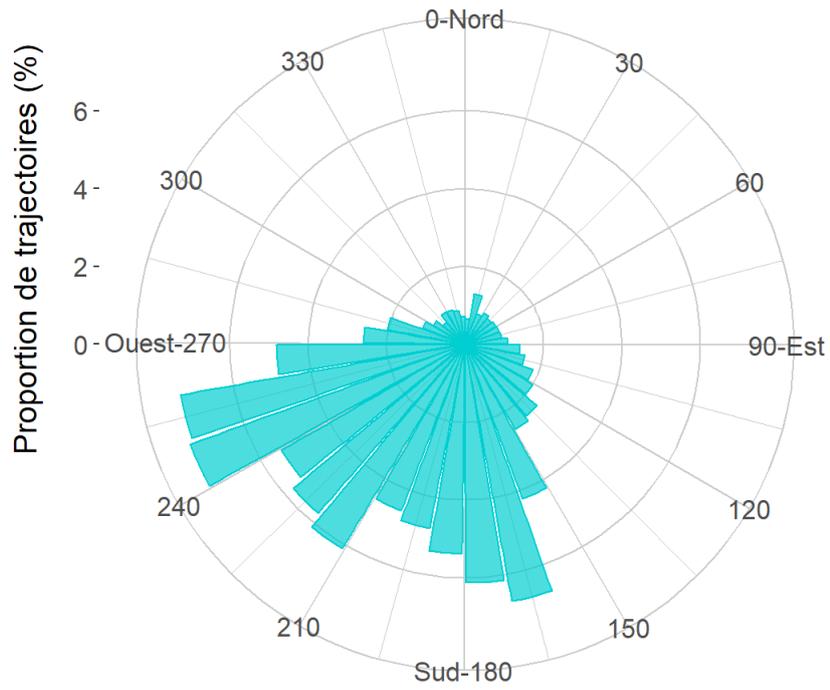


Figure 31: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Octobre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Octobre 2021

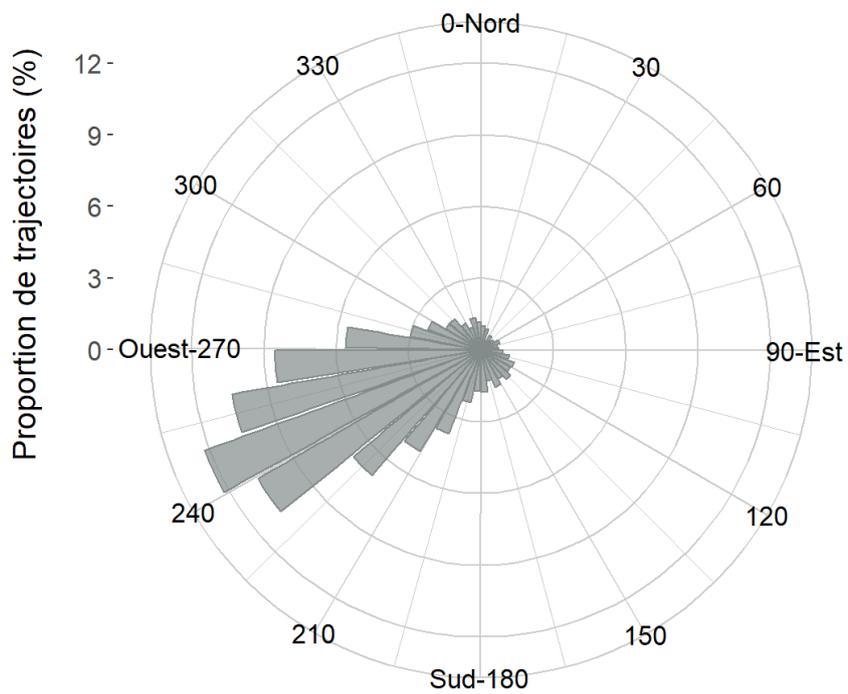


Figure 32: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Octobre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.7 Novembre

En novembre, les déplacements de jour et de nuit sont tous orientés vers la direction principale de migration observée de nuit en septembre et octobre (ouest-sud-ouest), parallèlement à la côte.

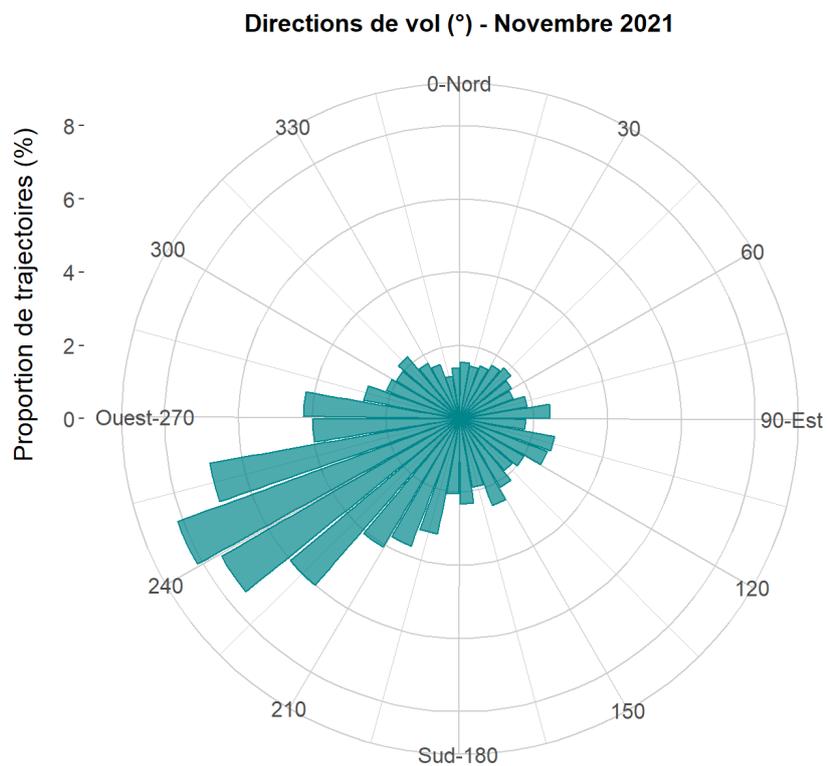


Figure 33: Distribution des directions de vol obtenues en Octobre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Novembre 2021

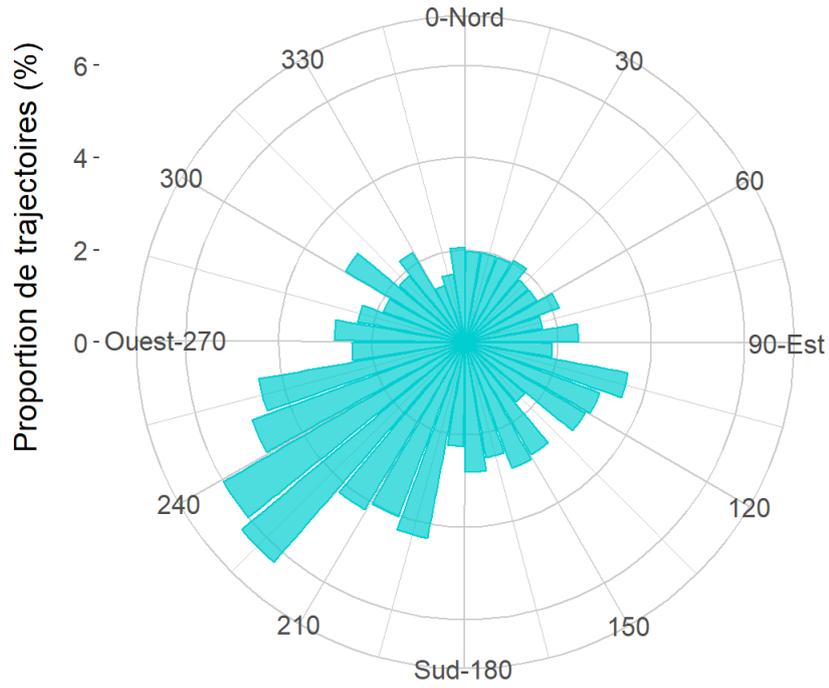


Figure 34: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Novembre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Novembre 2021

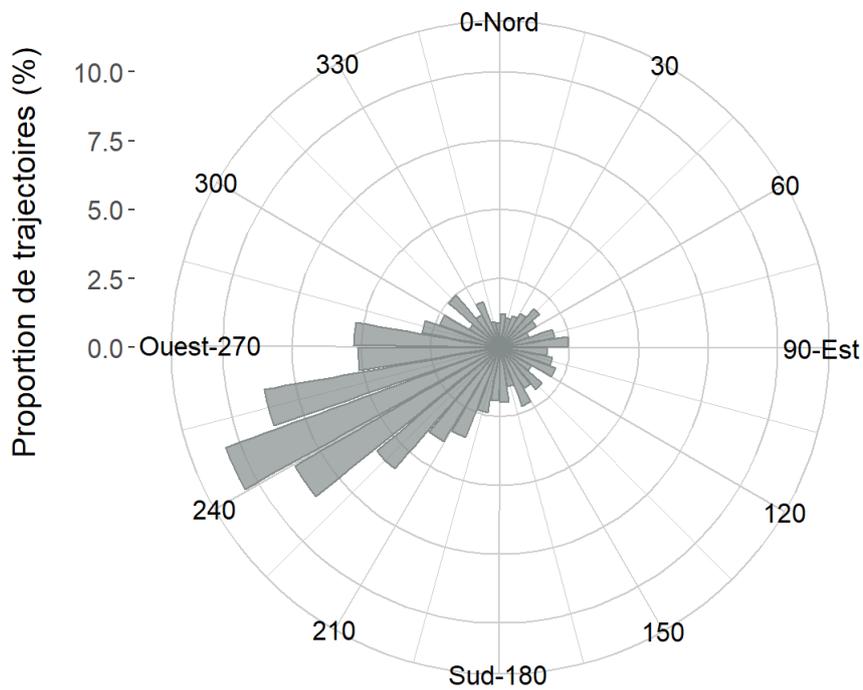


Figure 35: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Novembre 2021. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.8 Janvier

En janvier les directions de vol sont réparties de manière plus homogène, avec toutefois une représentation légèrement plus importante des trajectoires vers le sud.

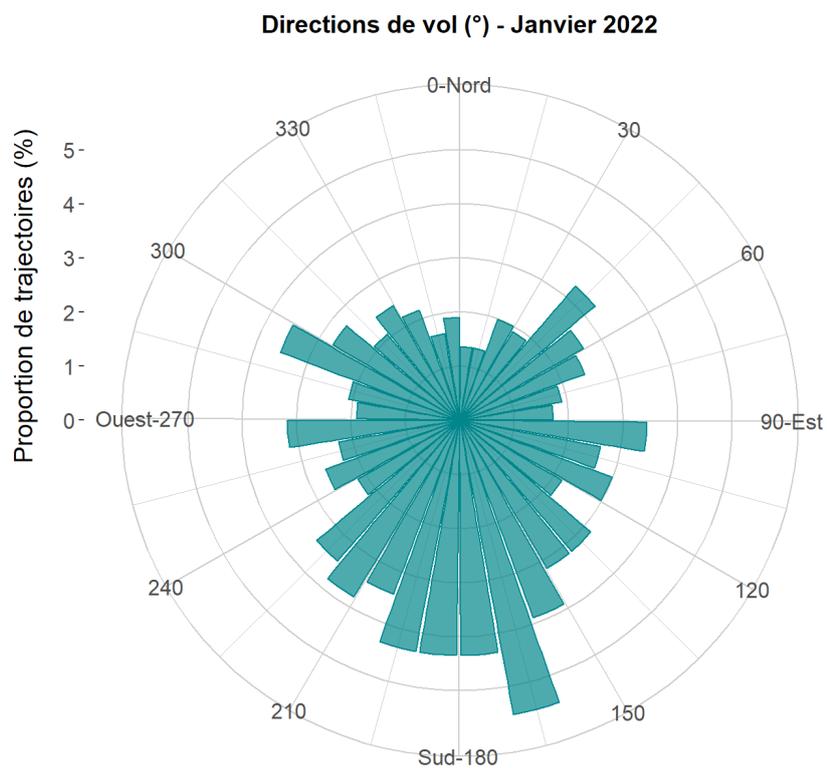


Figure 36: Distribution des directions de vol obtenues en Janvier 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Janvier 2022

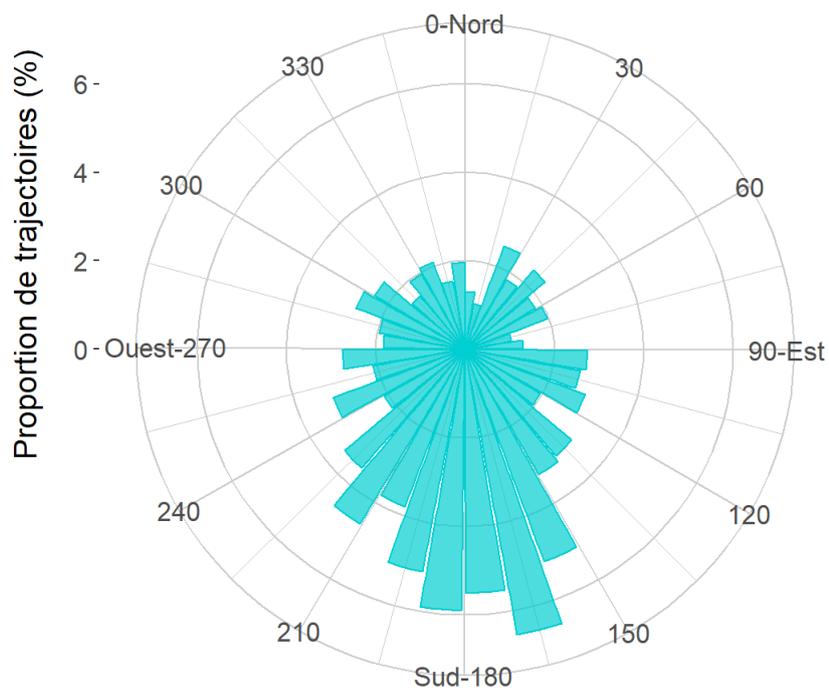


Figure 37: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Janvier 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Janvier 2022

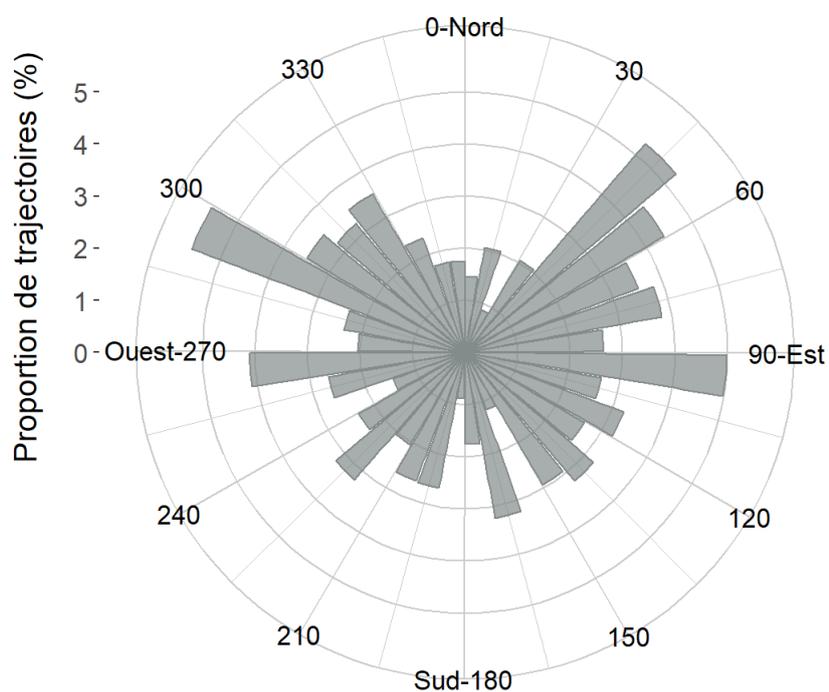


Figure 38: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Janvier 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.9 Février

En février les directions de vol se repolarisent vers le quart nord-est, indiquant le démarrage de la migration prénuptiale. Ces mouvements ont lieu à la fois de jour et de nuit.

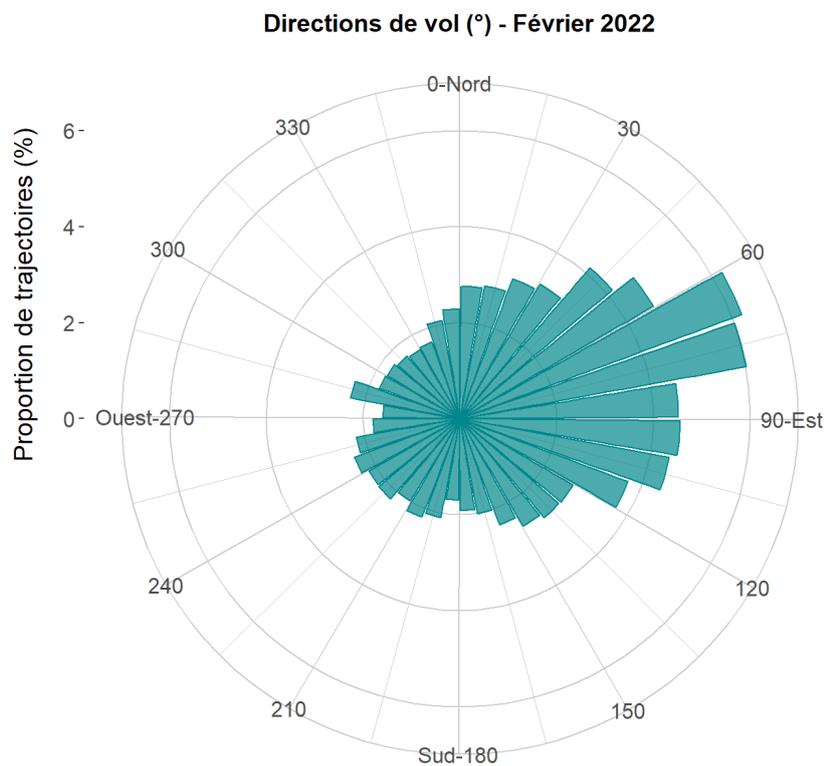


Figure 39: Distribution des directions de vol obtenues en Février 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Février 2022

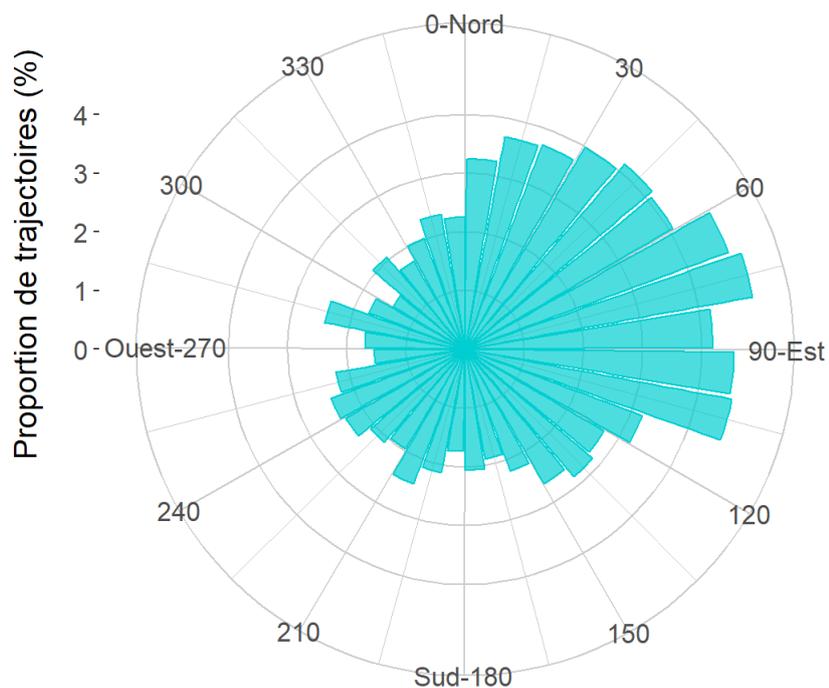


Figure 40: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Février 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Février 2022

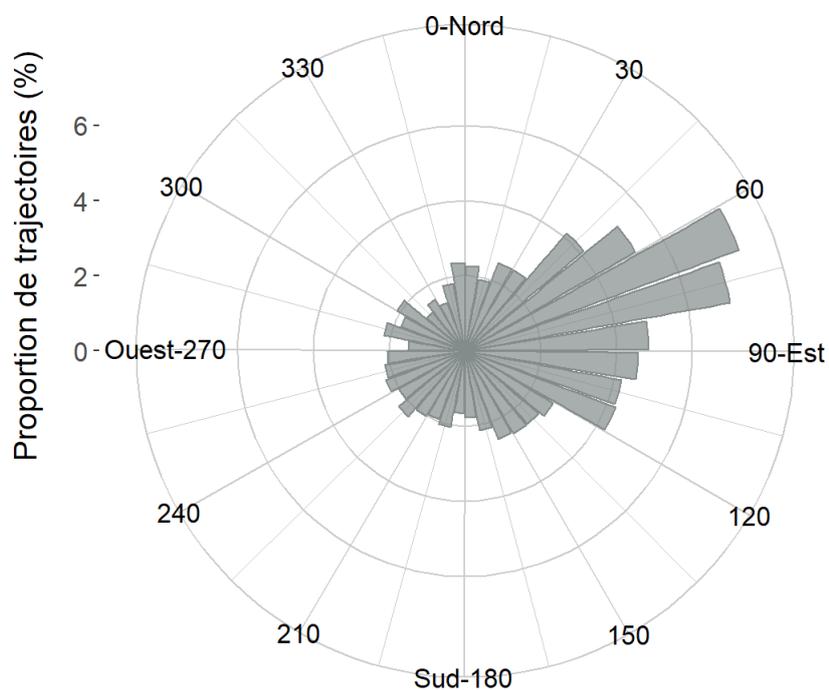


Figure 41: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Février 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.10 Mars

En mars les directions de vol sont similaires à celles de février, avec toutefois une légère différence entre les directions de vol diurnes et nocturnes. La nuit les oiseaux volent en effet légèrement plus vers l'est, et le jour plus vers le nord.

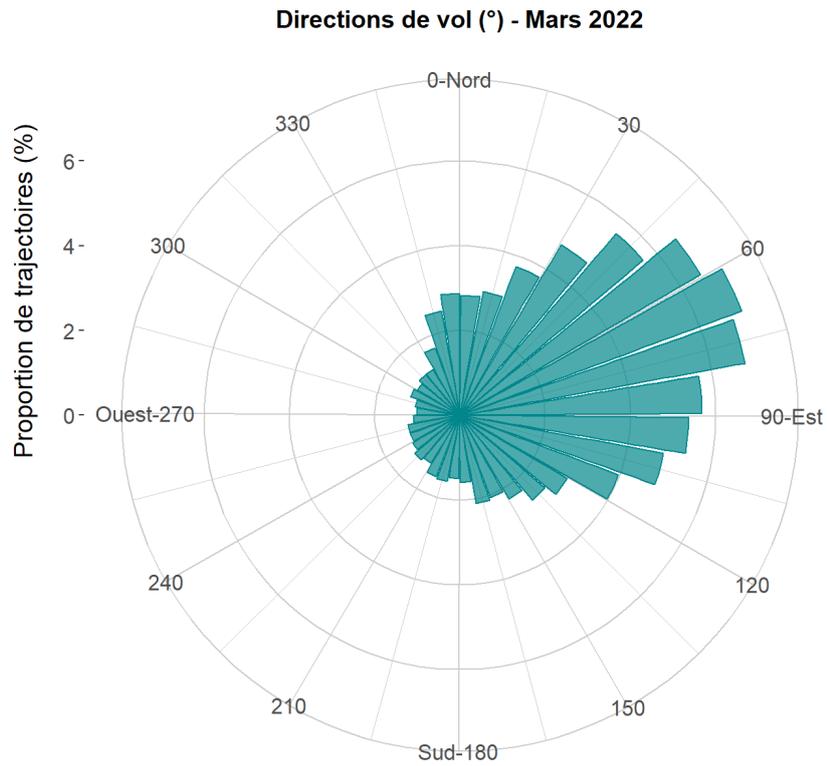


Figure 42: Distribution des directions de vol obtenues en Mars 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Mars 2022

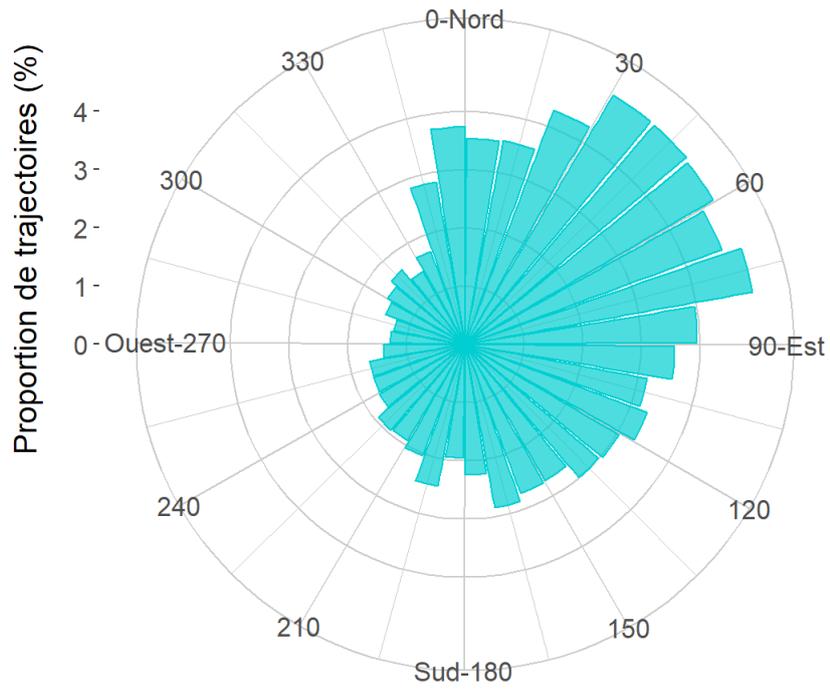


Figure 43: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Mars 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Mars 2022

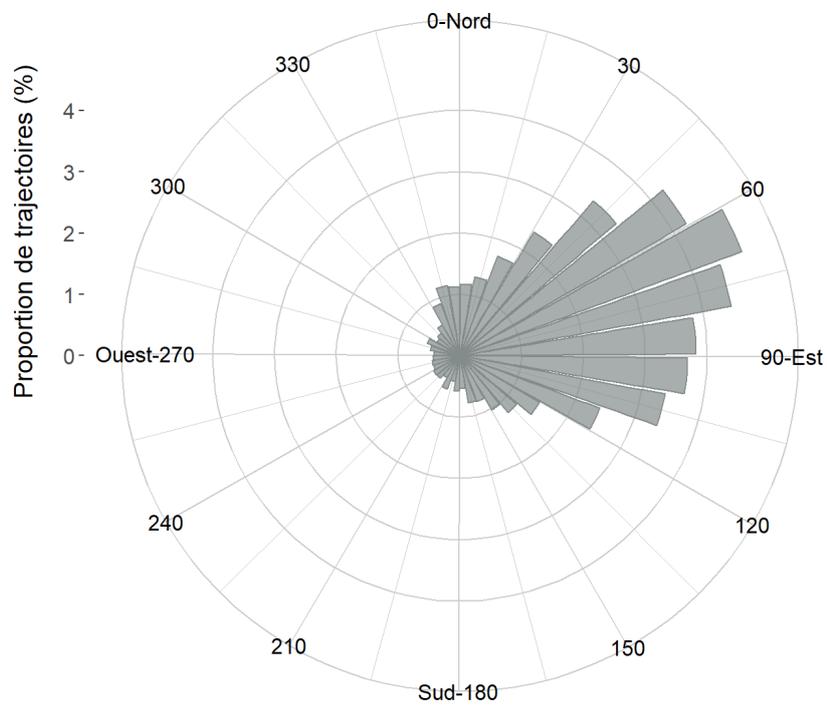


Figure 44: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Mars 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.3.11 Avril

Les directions de vol du mois d'avril sont similaires à celles du mois de mai, avec des déplacements vers l'est en journée, et des mouvements vers les îles britanniques (nord-nord-ouest) de nuit.

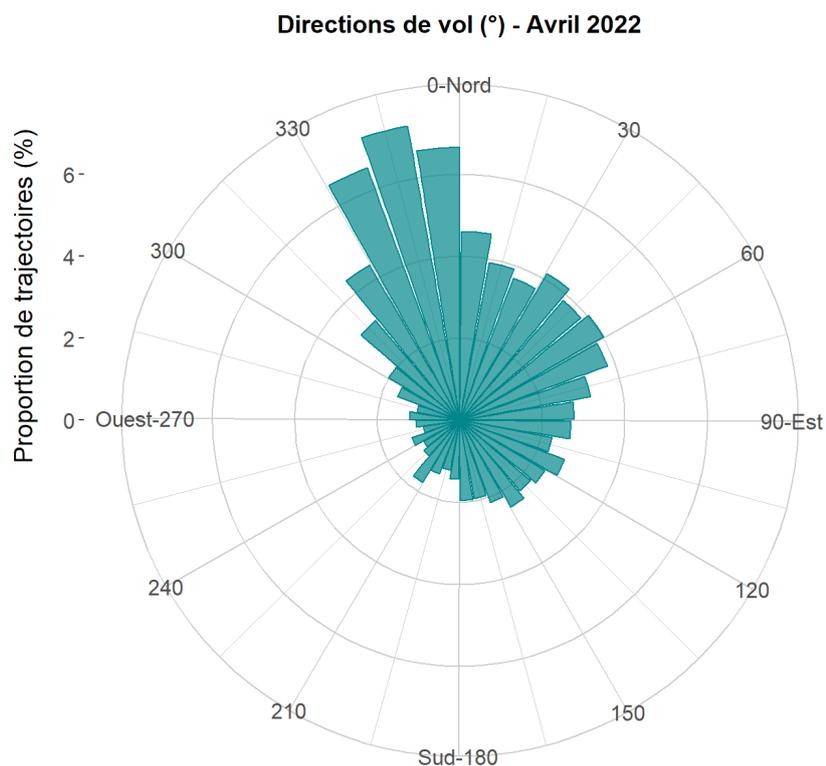


Figure 45: Distribution des directions de vol obtenues en Avril 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de jour - Avril 2022

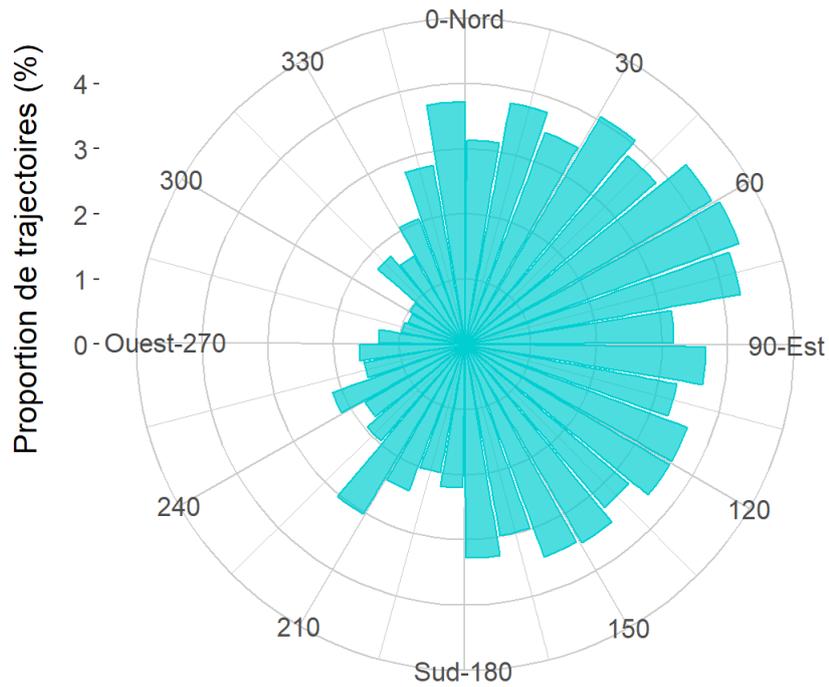


Figure 46: Distribution des directions de vol obtenues le jour en Avril 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

Directions de vol (°) de nuit - Avril 2022

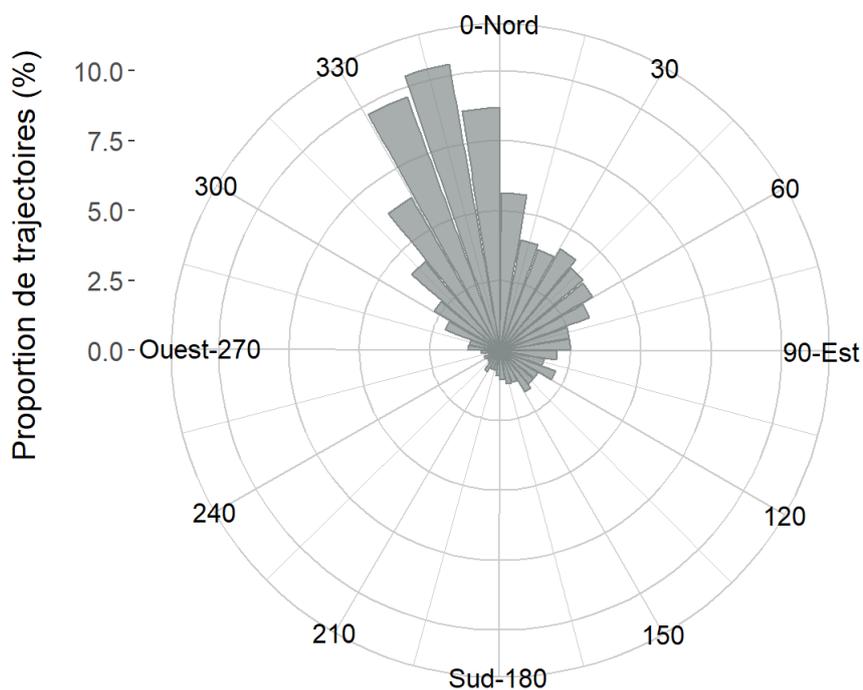


Figure 47: Distribution des directions de vol obtenues la nuit en Avril 2022. La somme des pourcentages obtenus par classe de 10° vaut 100%.

3.4 Hauteurs de vol

3.4.1 Rappel de la méthode

Géométriquement, la gamme d'altitude couverte par le radar augmente à mesure que l'on s'éloigne de ce dernier (Figure 2, Figure 48).

Comme indiqué au paragraphe 2.3.2.3, l'analyse des hauteurs de vol a été principalement effectuée au niveau de la capacité maximale de détection du radar afin de pouvoir fournir des résultats quantitatifs. Les altitudes ainsi couvertes sont comprises dans l'intervalle 0-200 m.

Dans les paragraphes suivants où les distributions des hauteurs de vol sont présentées par mois, ont été spécifiées les hauteurs (i) du bas de pale - 25 m, (ii) du haut de pale - 175 m des éoliennes du projet EOHF, l'intervalle 25-175 m constituant la zone à risque de collision maximal pour l'avifaune.

Il faut aussi rappeler que, comme indiqué précédemment, le radar utilisé ne permet pas de détecter les petites cibles volant seules, notamment les passereaux et autres oiseaux migrateurs terrestres de petite taille. Or ces petites cibles constituent les flux nocturnes migratoires nocturnes les plus importants. Les proportions indiquées ci-après sont donc à considérer pour les espèces de taille moyenne à grande, ou pour les vols (groupés) d'oiseaux de petite taille.

3.4.2 Altitudes totales détectées

Le graphique suivant (Figure 48) présente les données brutes de détection des altitudes de vol en fonction de la distance au radar.

Même si des trajectoires ont été enregistrées jusqu'à 1665 m au-dessus de la mer à plus de 5.5 km du radar, la majorité des déplacements a été enregistrée à moins de 200 m d'altitude.

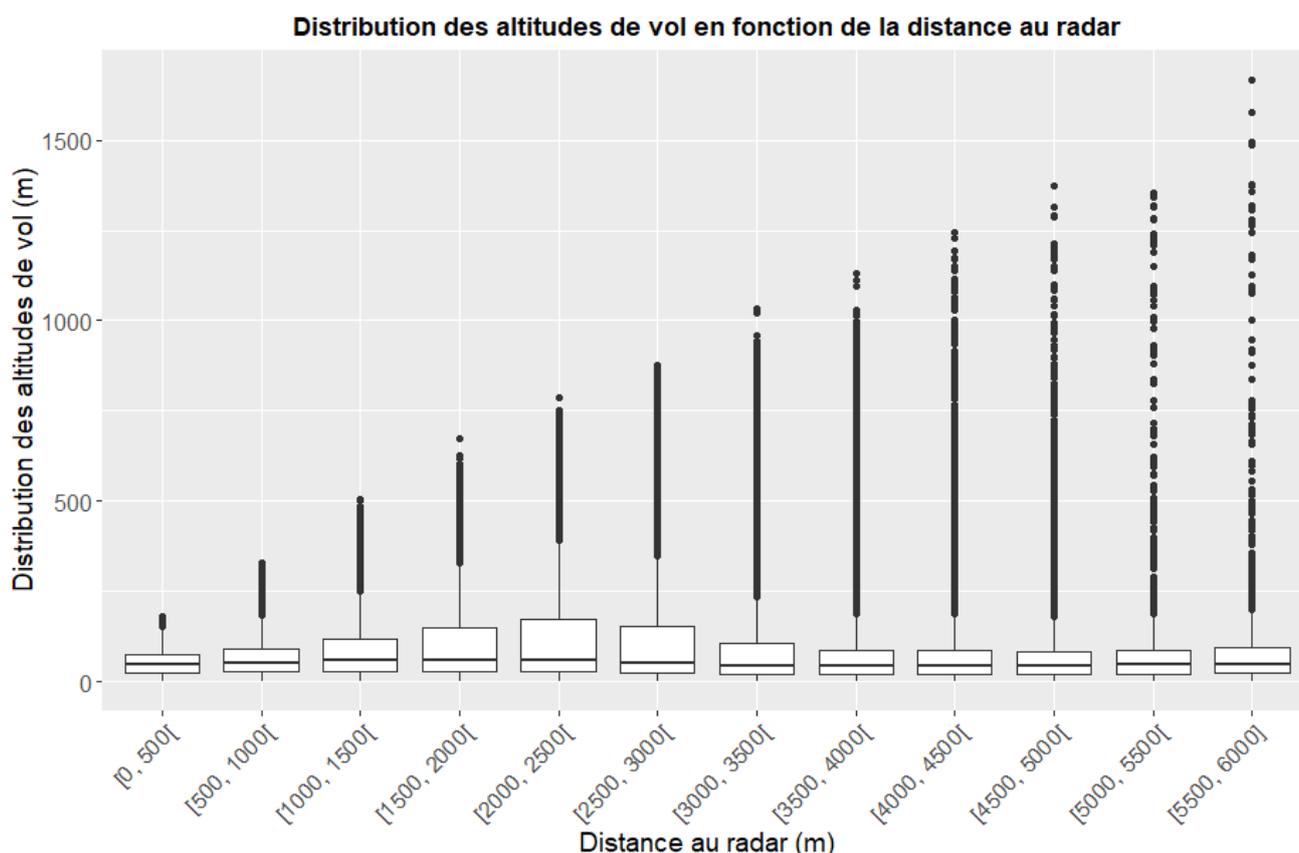


Figure 48: Distribution des altitudes de vol enregistrées en fonction de la distance au radar.

3.4.3 Mai

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Mai :

- 6.0% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 6.0% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 88.0% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Mai, 51.7% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 48.3% de nuit.

En mai, les hauteurs de vol moyennes sont plus élevées que les mois suivants, ce qui est typique en période de migration (cf. mois de Septembre à Novembre, et Février-Mars).

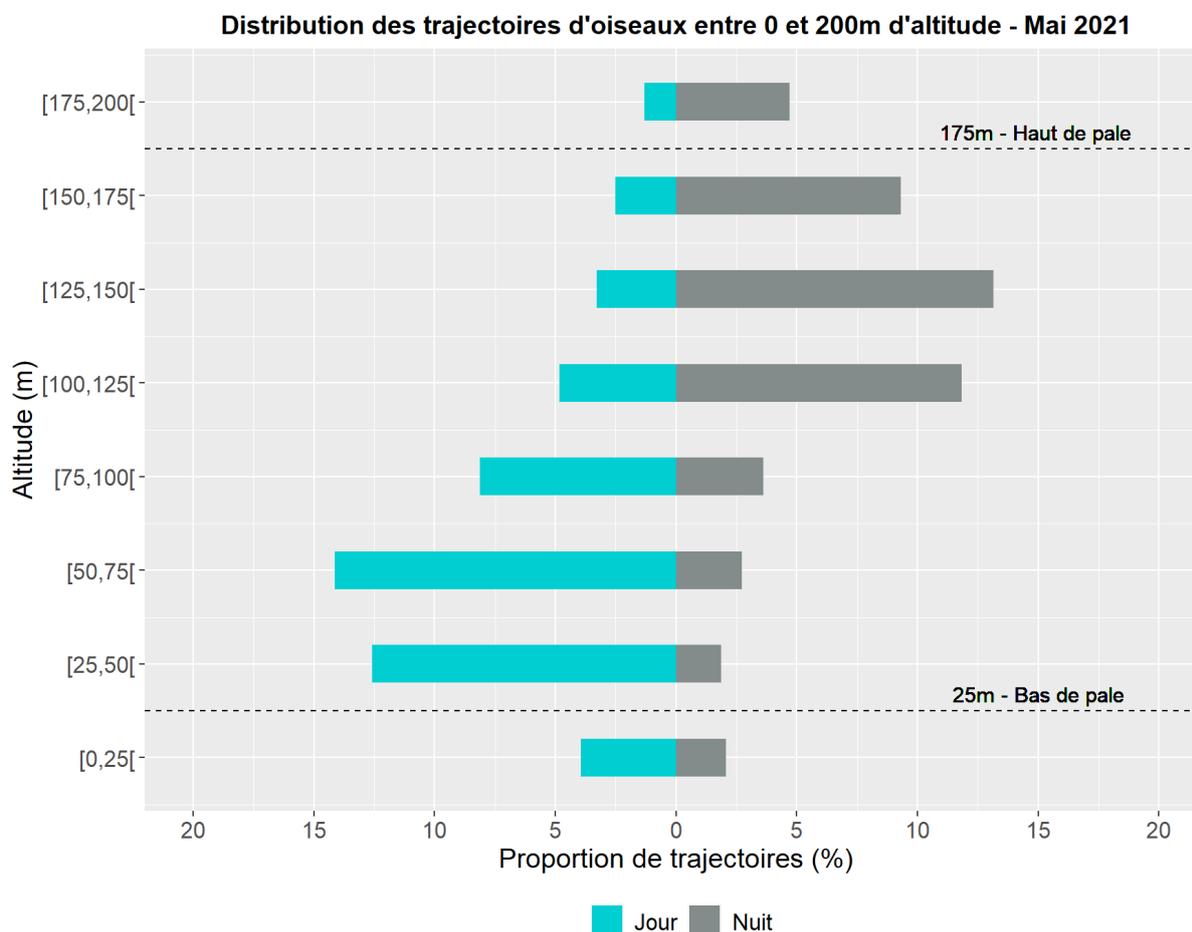


Figure 49: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Mai 2021.

3.4.4 Juin

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Juin :

- 36.6% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 0.3% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 63.1% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Juin, 78.5% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 21.5% de nuit.

Hors période de migration, les déplacements se concentrent de jour et à basse altitude.

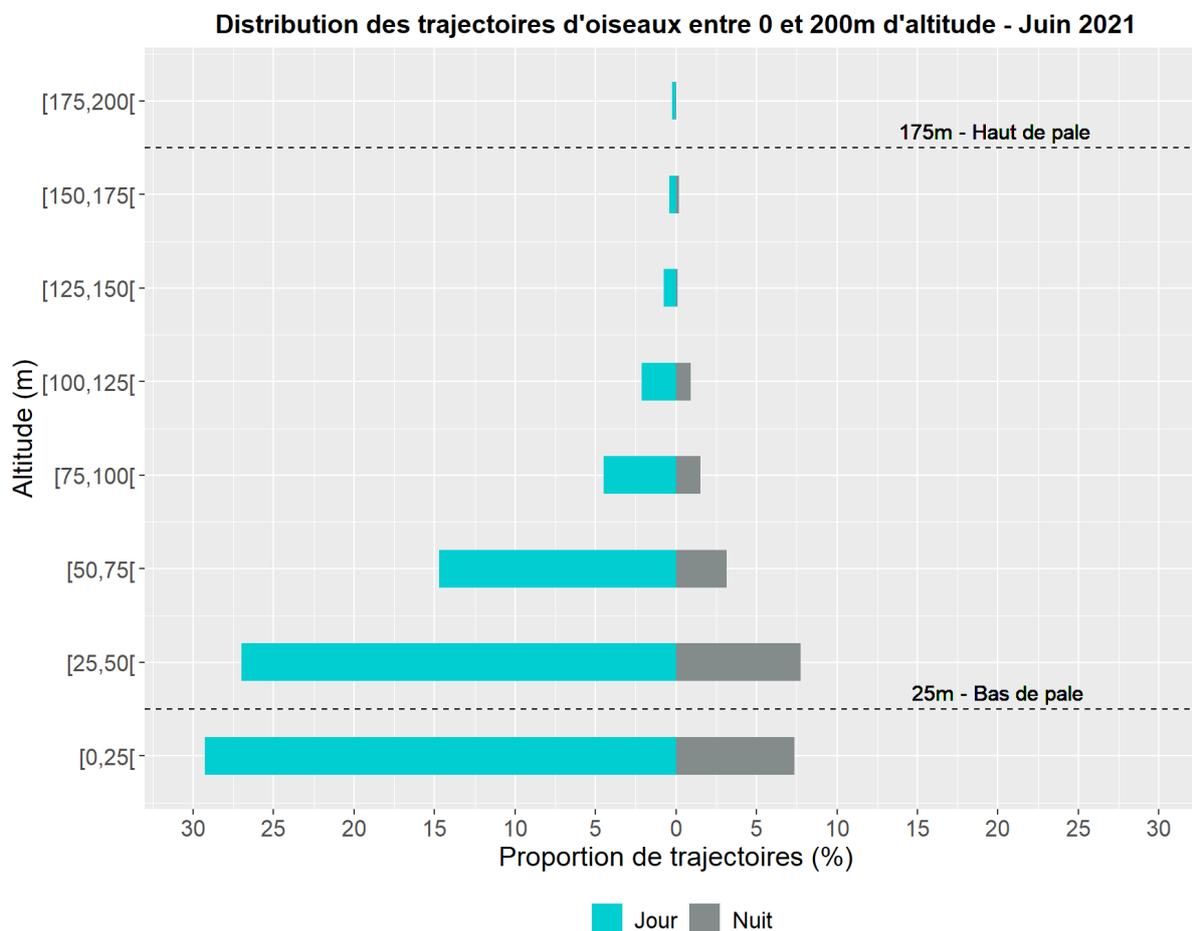


Figure 50: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Juin 2021.

3.4.5 Juillet

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Juillet :

- 26.2% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 2.9% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 70.9% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Juillet, 50.2% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 49.8% de nuit.

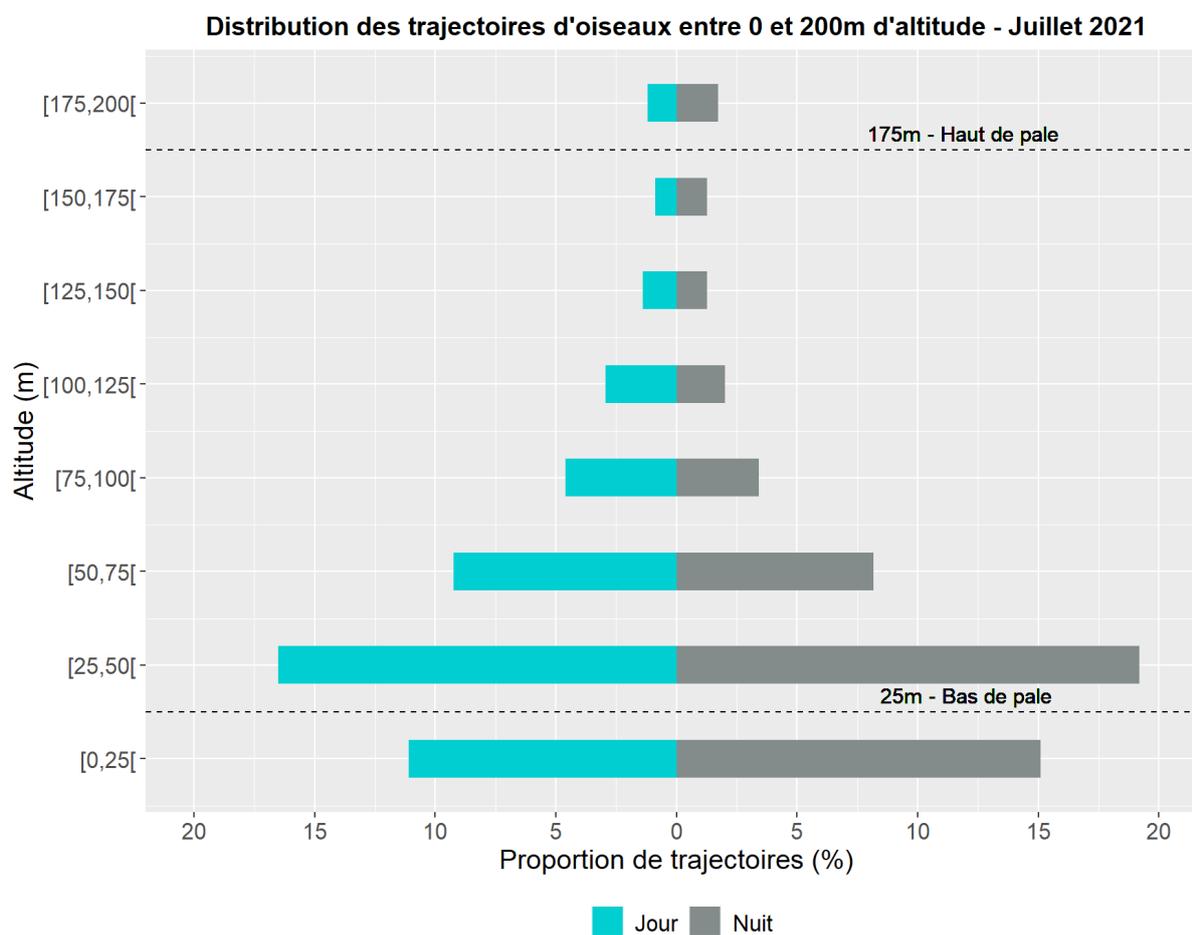


Figure 51: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Juillet 2021.

3.4.6 Août

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Août :

- 51.3% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 0.9% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 47.8% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Août, 48.1% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 51.9% de nuit.

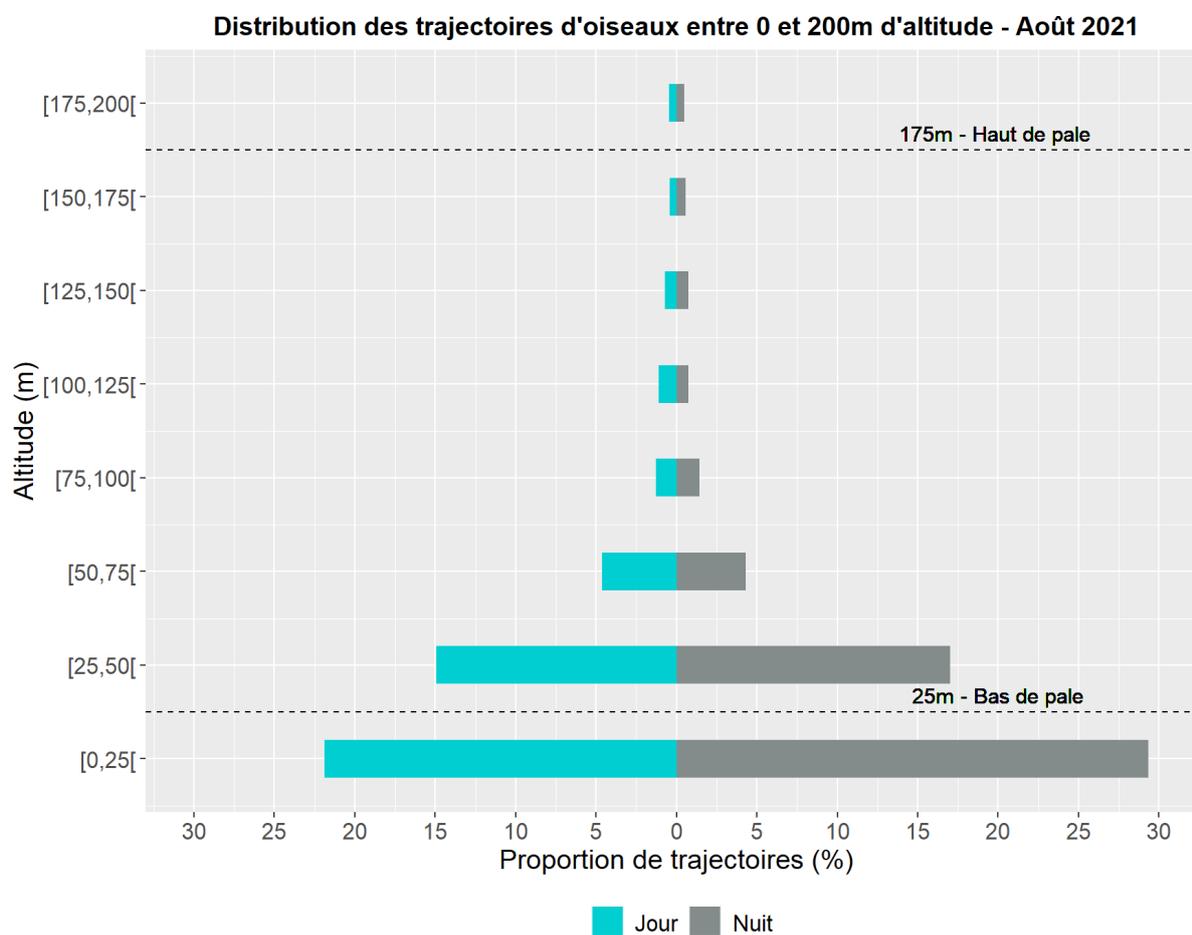


Figure 52: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois d'Août 2021.

3.4.7 Septembre

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Septembre :

- 20.0% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 1.1% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 78.9% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Septembre, 44.5% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 55.5% de nuit.

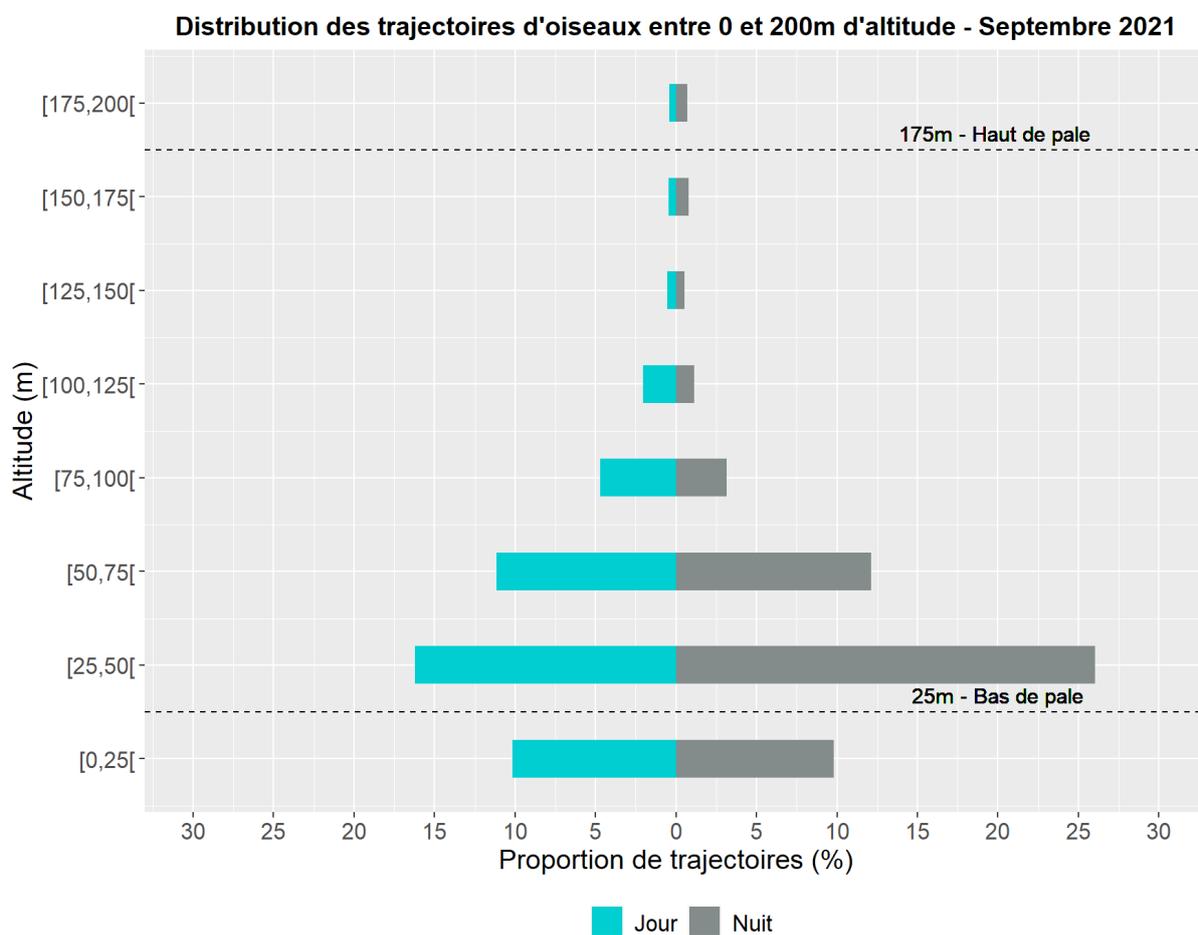


Figure 53 : Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Septembre 2021.

3.4.8 Octobre

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Octobre :

- 13.0% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 1.8% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 85.2% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Octobre, 42.8% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 57.2% de nuit.

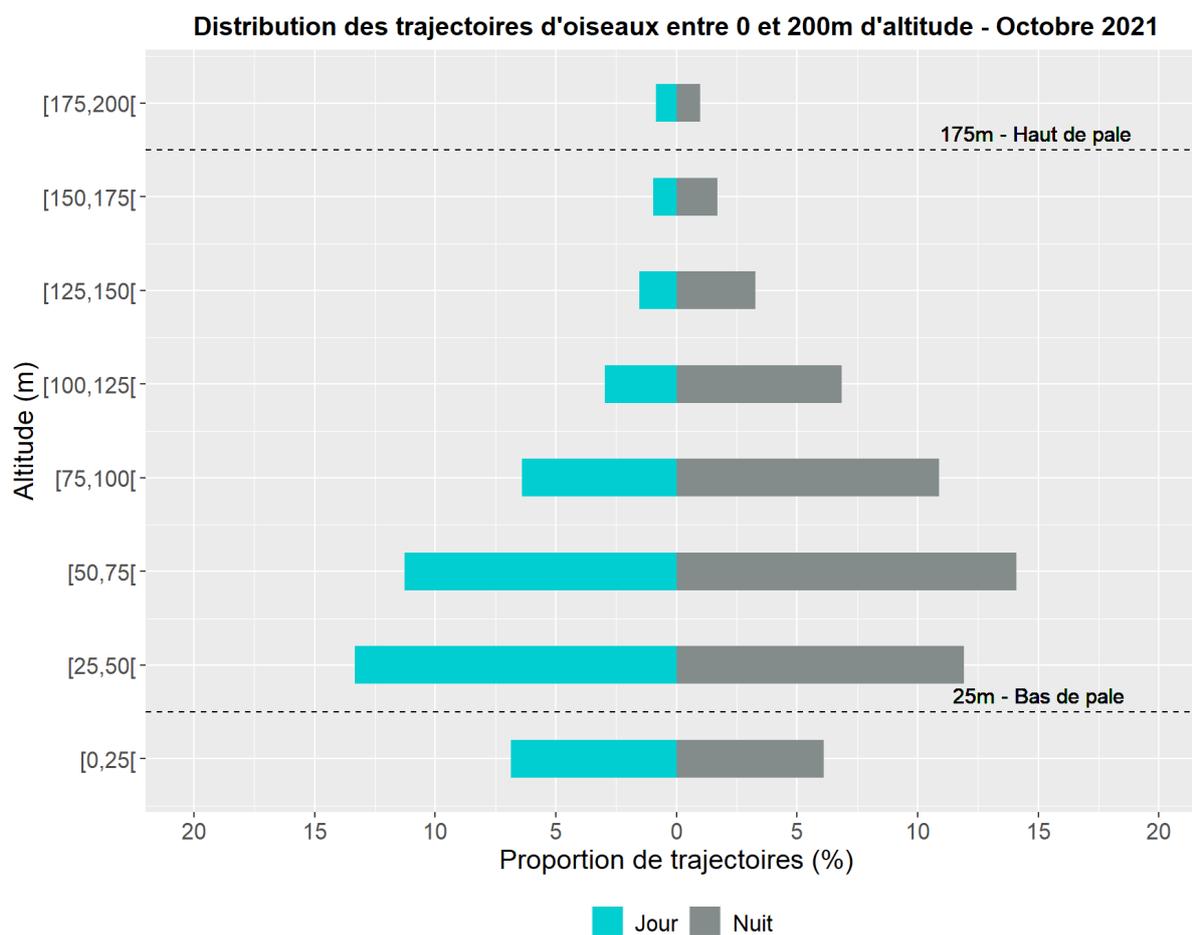


Figure 54: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois d'Octobre 2021.

3.4.9 Novembre

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Novembre :

- 15.3% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 2.6% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 82.1% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Novembre, 41.0% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 59.0% de nuit.

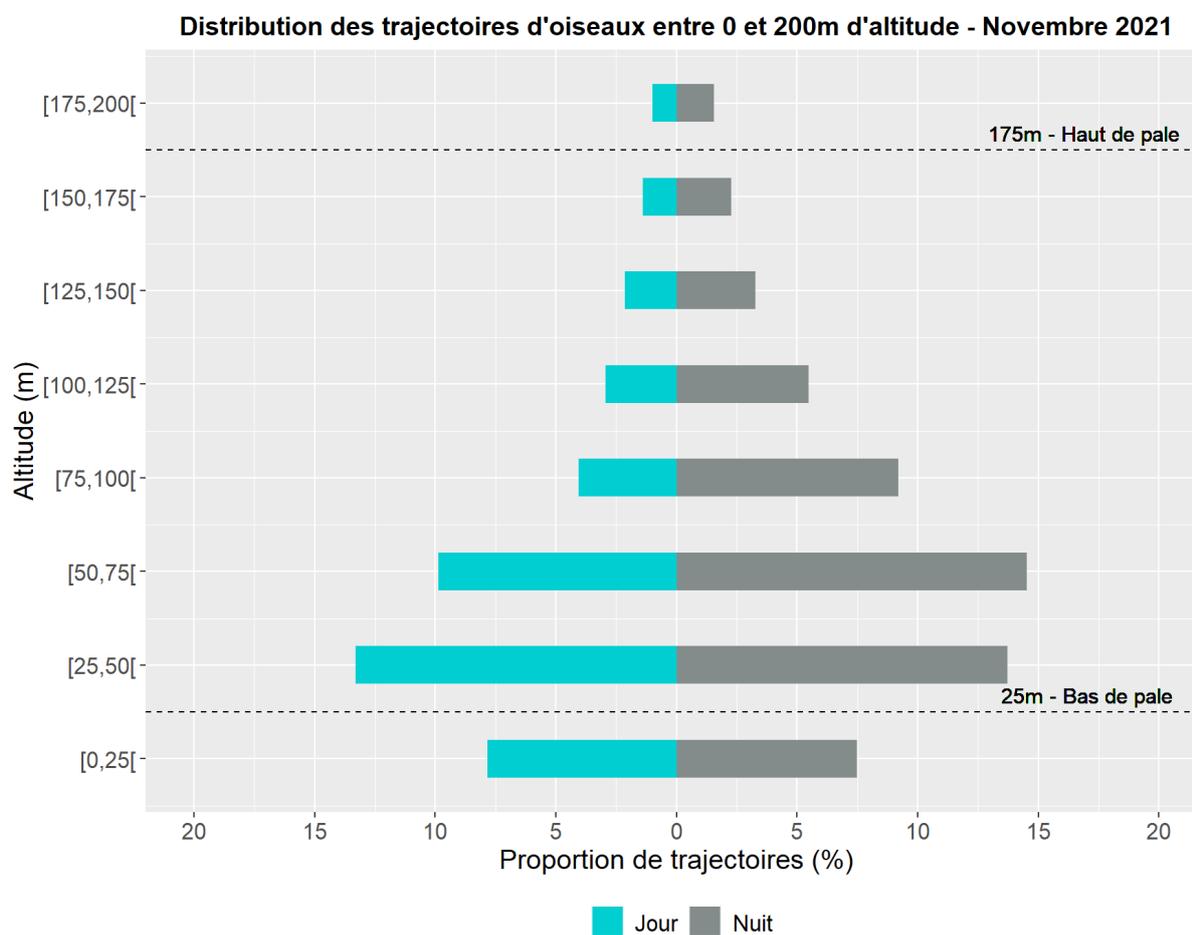


Figure 55: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Novembre 2021.

3.4.10 Janvier

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Janvier :

- 22.0% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 5.4% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 72.6% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Janvier, 72.8% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 27.2% de nuit.

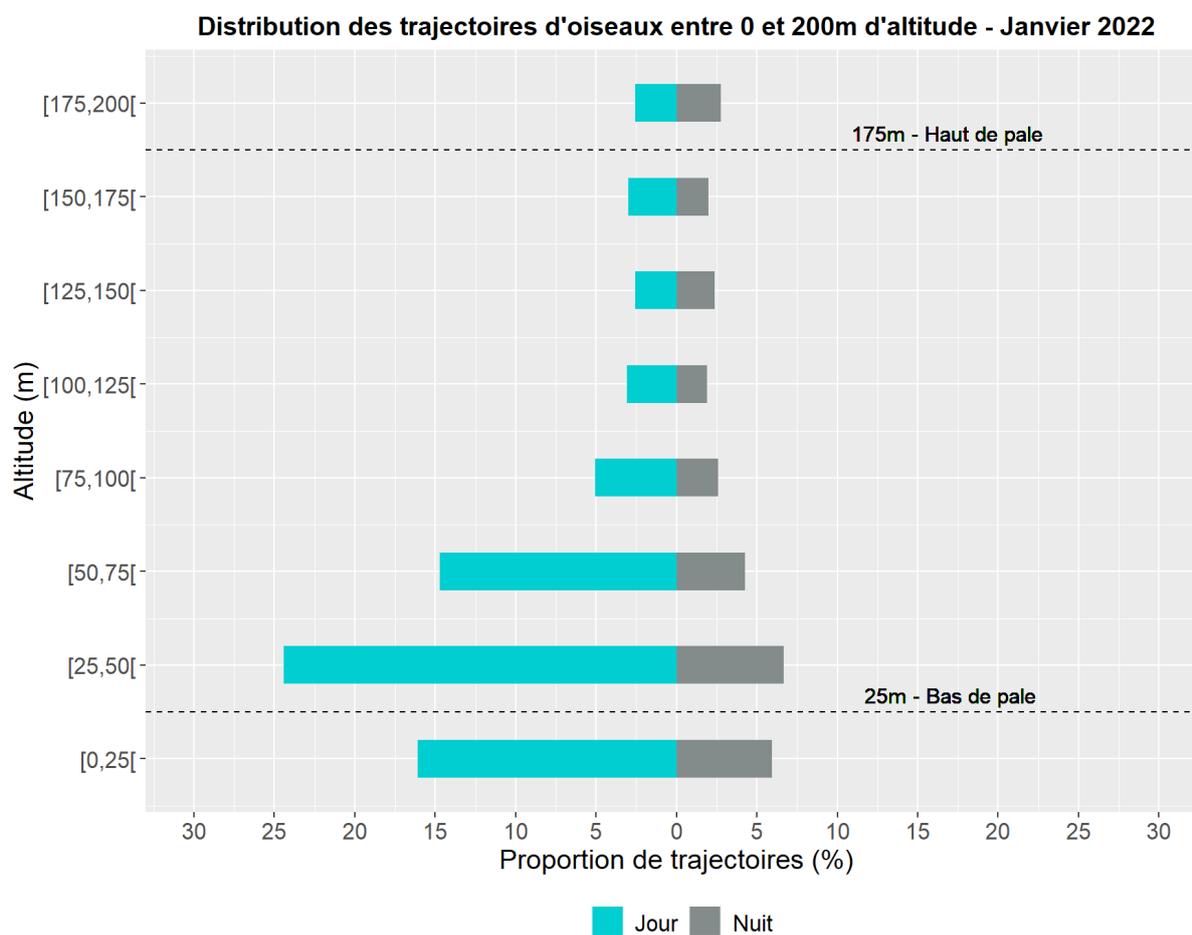


Figure 56: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Janvier 2022.

3.4.11 Février

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Février :

- 14.0% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 7.2% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 78.8% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Février, 50.2% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 49.8% de nuit.

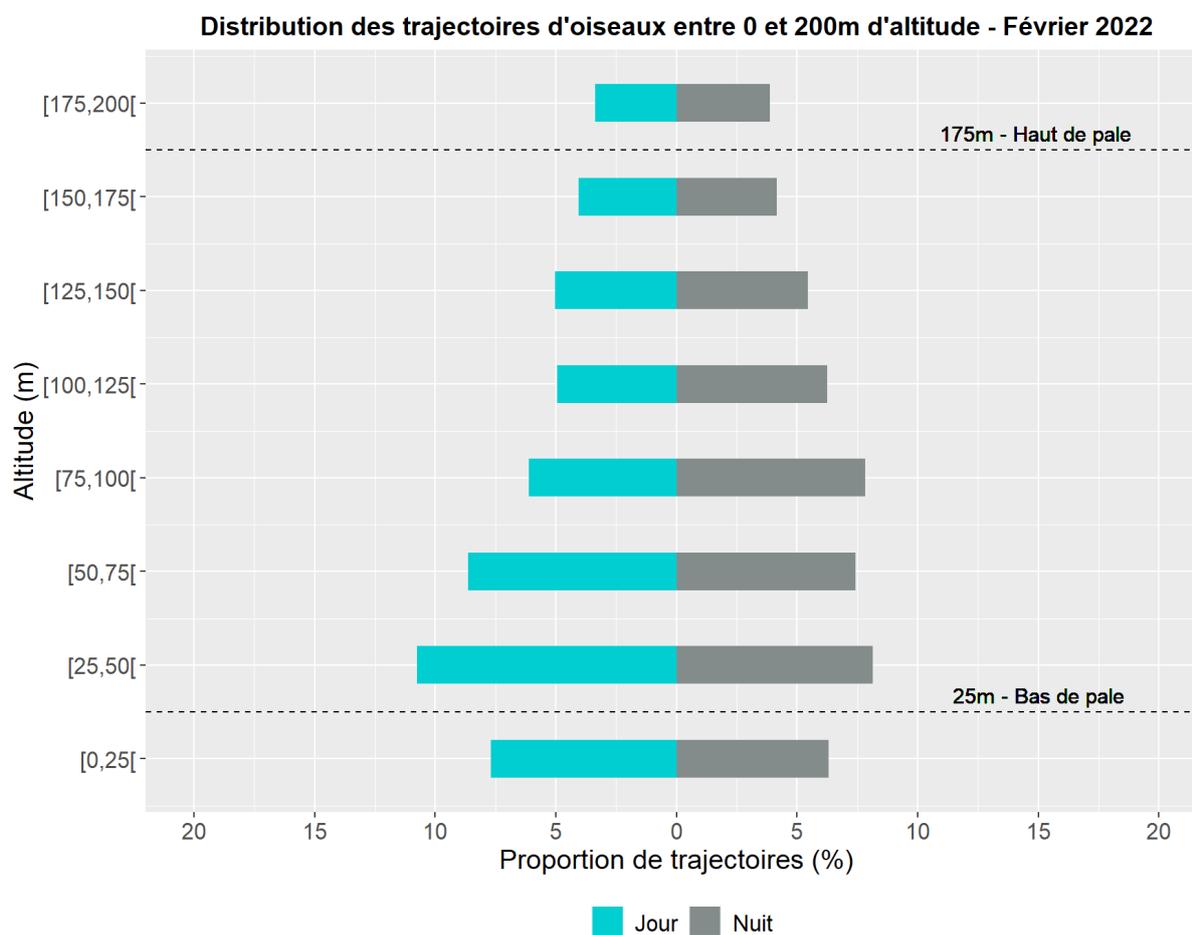


Figure 57: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Février 2022.

3.4.12 Mars

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Mars :

- 12.7% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 3.8% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 83.5% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m en Mars, 44.2% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 55.8% de nuit.

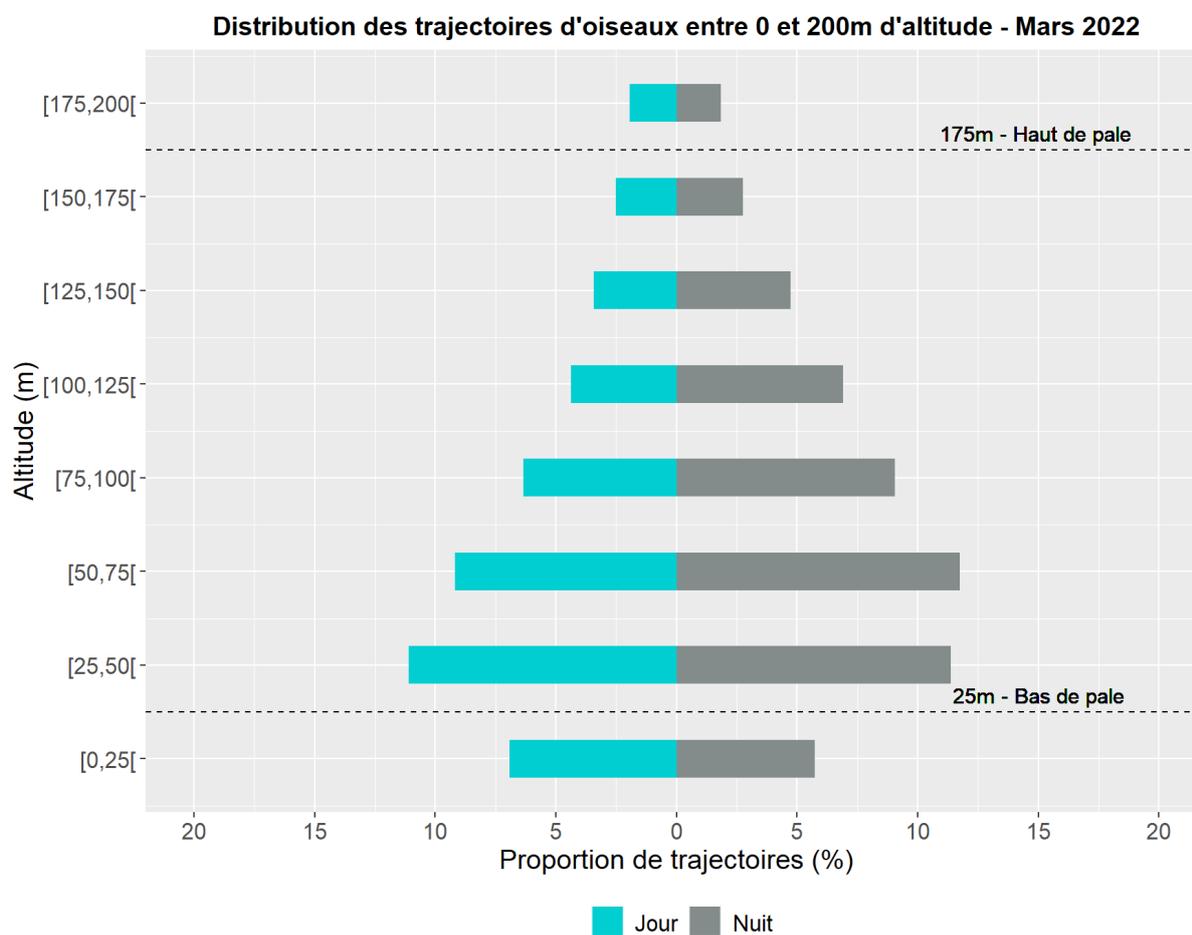


Figure 58: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois de Mars 2022.

3.4.13 Avril

Dans l'intervalle d'altitude [0, 200] m en Avril :

- 65.4% des trajectoires ont une hauteur inférieure à 25m (qui correspond à la hauteur de bas de pale d'une éolienne)
- 0.9% des trajectoires ont une hauteur supérieure à 175m (haut de pale)
- 33.7% des trajectoires ont une hauteur comprise entre 25 et 175m, qui correspond à la zone balayée par les pales.

Dans l'intervalle d'altitude [25, 175] m, 39.2% des trajectoires ont été enregistrés de jour et 60.8% de nuit.

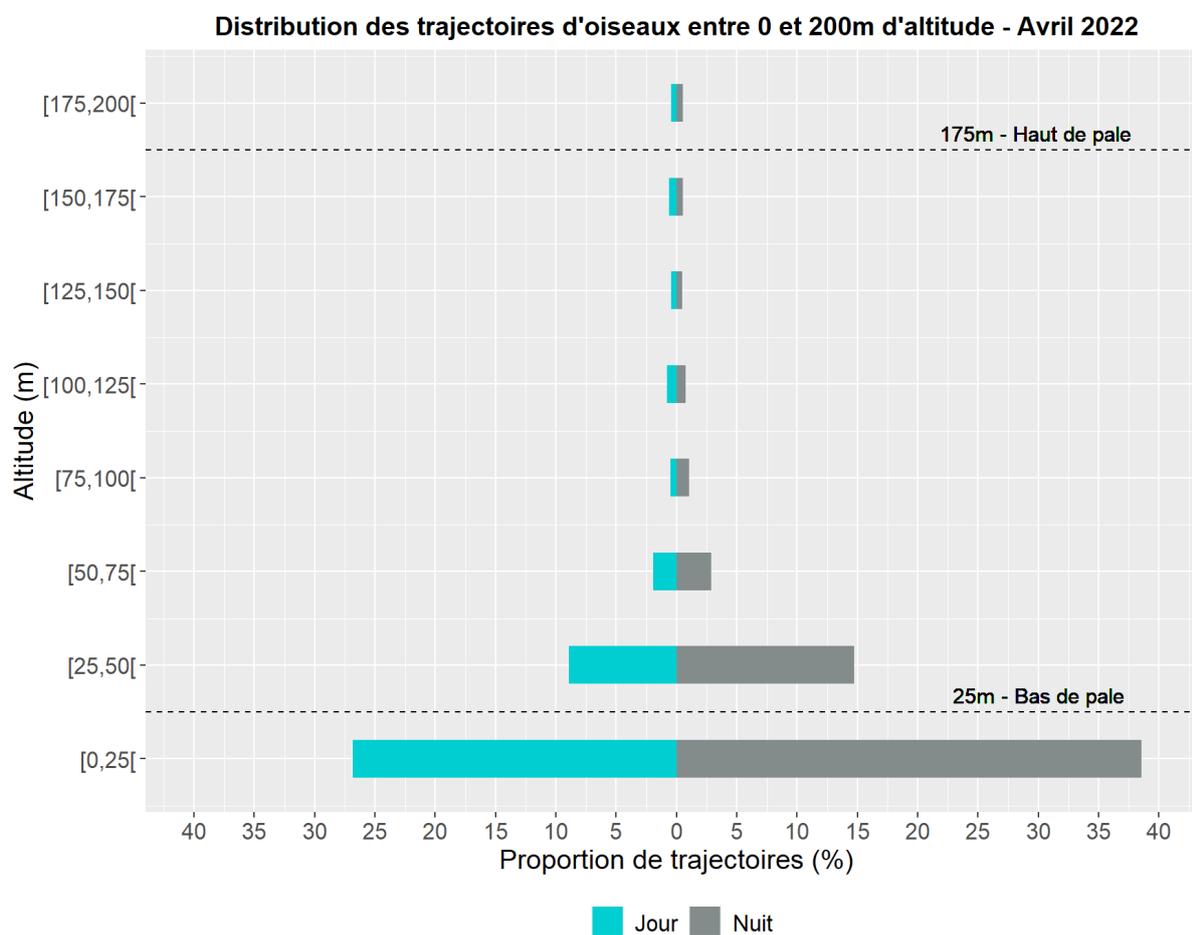


Figure 59: Distribution des hauteurs de vol obtenues entre 0 et 200m d'altitude pour le mois d'Avril 2022.

3.5 Synthèse spatiale des déplacements

3.5.1 Répartition spatiale de l'activité

Une analyse comparative a été menée entre la zone de projet couverte par le radar et l'extérieur du projet, pour étudier si des différences existaient en phase avant-projet.

La figure suivante présente les deux zones étudiées, considérées comme (A) majoritairement au sein de la zone de projet et (B) majoritairement en-dehors de la zone de projet du parc éolien en mer de Fécamp.

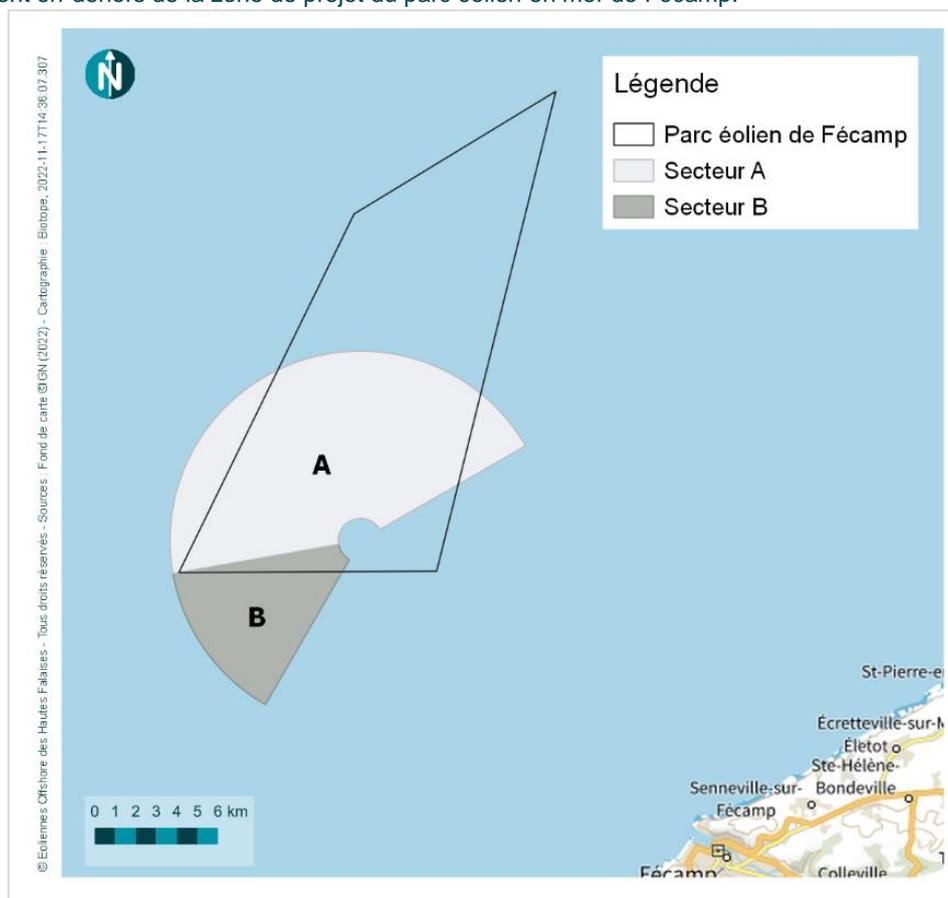


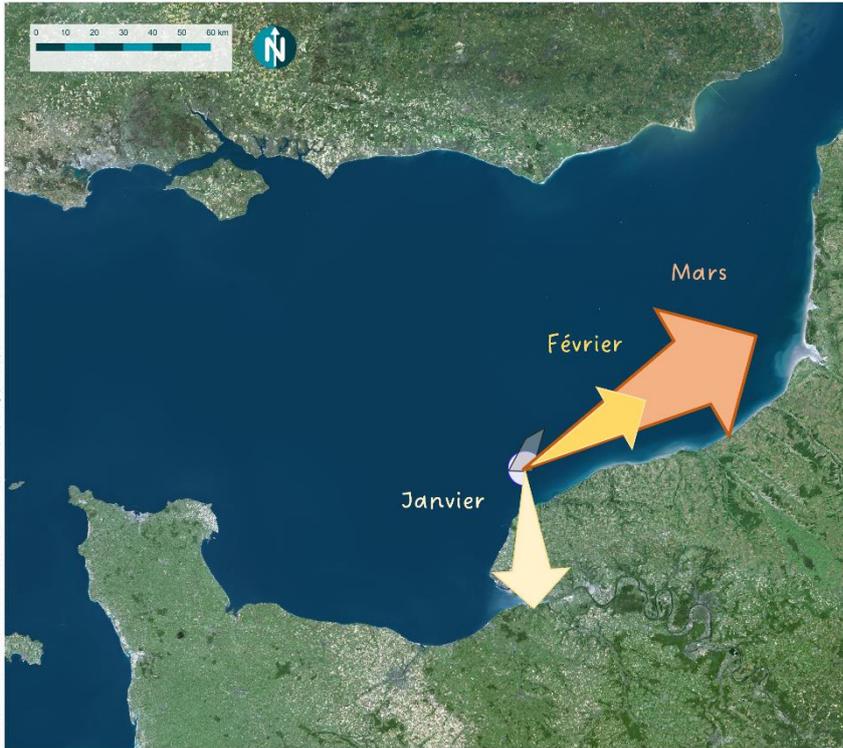
Figure 60: Carte représentant l'emprise du parc éolien de Fécamp ainsi que deux secteurs A et B du suivi par radar entre lesquels la répartition des trajectoires d'oiseaux a été comparée.

Les résultats montrent une répartition spatiale des trajectoires d'oiseaux proportionnelle à la surface de ces deux zones quelle que soit la saison, ce qui indique une répartition homogène des trajectoires. La différence de répartition entre les deux zones n'atteint en effet que 1% en moyenne ($\pm 1\%$).

L'activité de vol des oiseaux est donc homogène en phase avant-projet.

3.5.2 Synthèse cartographique des déplacements

Les cartes suivantes synthétisent et représentent spatialement les mouvements principaux enregistrés par le radar au cours des différentes saisons.



© Observatoire Français des Océans et du Littoral (OFOS) - Tous droits réservés - Sources : Floc de juin 06/06 (2020) - Cartographie : Biotope, 2023 (1/30/17/04/47/61)

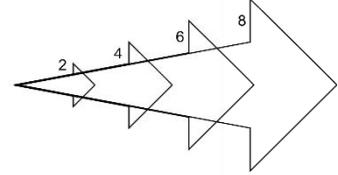
Synthèse des déplacements enregistrés par radar - Suivi MSu5

Parc éolien en mer de Fécamp

Légende

-  Emprise du suivi radar (rayon: 6 km)
-  Parc éolien de Fécamp

Les flèches indiquent les directions les plus représentées (modes) au sein des distributions mensuelles. Leur longueur est proportionnelle au nombre moyen de trajectoires d'oiseaux enregistrées par heure et par kilomètre dans ces directions.



© Observatoire Français des Océans et du Littoral (OFOS) - Tous droits réservés - Sources : Floc de juin 06/06 (2020) - Cartographie : Biotope, 2023 (1/30/17/04/47/61)

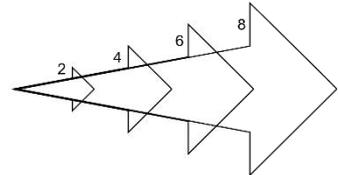
Synthèse des déplacements enregistrés par radar - Suivi MSu5

Parc éolien en mer de Fécamp

Légende

-  Emprise du suivi radar (rayon: 6 km)
-  Parc éolien de Fécamp

Les flèches indiquent les directions les plus représentées (modes) au sein des distributions mensuelles. Leur longueur est proportionnelle au nombre moyen de trajectoires d'oiseaux enregistrées par heure et par kilomètre dans ces directions.





© Observatoire Français des Insectes Évolués. Tous droits réservés. Sources : Photo de juin 06/06 (2023) ; Cartographie : Biotope, 2023. (1/30) 1706.47.031

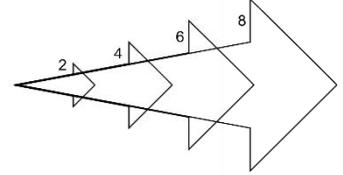
Synthèse des déplacements enregistrés par radar - Suivi MSu5

Parc éolien en mer de Fécamp

Légende

-  Emprise du suivi radar (rayon : 6 km)
-  Parc éolien de Fécamp

Les flèches indiquent les directions les plus représentées (modes) au sein des distributions mensuelles. Leur longueur est proportionnelle au nombre moyen de trajectoires d'oiseaux enregistrées par heure et par kilomètre dans ces directions.



© Observatoire Français des Insectes Évolués. Tous droits réservés. Sources : Photo de juin 06/06 (2023) ; Cartographie : Biotope, 2023. (1/30) 1706.47.031

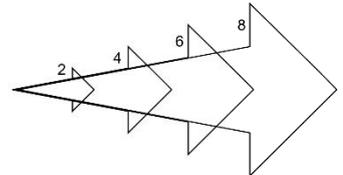
Synthèse des déplacements enregistrés par radar - Suivi MSu5

Parc éolien en mer de Fécamp

Légende

-  Emprise du suivi radar (rayon : 6 km)
-  Parc éolien de Fécamp

Les flèches indiquent les directions les plus représentées (modes) au sein des distributions mensuelles. Leur longueur est proportionnelle au nombre moyen de trajectoires d'oiseaux enregistrées par heure et par kilomètre dans ces directions.



4 Conclusion

Le suivi par radar réalisé dans le cadre de cette étude a permis d'apporter des éléments inédits sur plusieurs sujets.

Au niveau technique tout d'abord, il a permis de tester la première installation d'un radar ornithologique 3D fonctionnant de manière autonome en pleine mer.

Des problèmes d'alimentation électrique ont initialement retardé l'acquisition des données et ont affecté le taux de disponibilité des données sur certains mois, mais une fois le problème corrigé le radar a pu fonctionner de manière continue. L'oscillation du mât de mesures, due au vent et à la houle, a été une autre difficulté rencontrée, qui a nécessité un pré-traitement des données et a réduit la précision des mesures.

Le nombre total de données analysées a enfin été réduit par les conditions de mer, qui saturent le signal lorsque la houle renvoie une énergie supérieure à celle des oiseaux. Cette limite est classique à tous les radars, notamment les radars en bande X, et est d'autant plus importante pour les radars ornithologiques qui sont paramétrés pour détecter des cibles de toute petite taille (oiseaux) en comparaison des cibles habituellement détectées par ces derniers (bateaux, avions, nuages...). Le réglage du radar a été optimisé pour détecter les déplacements d'oiseaux sur le plus grand volume, pour couvrir au mieux la zone de projet. Vue l'échelle utilisée (6km), le radar détectait les oiseaux de taille moyenne à grande, ou les vols groupés d'espèce de petite taille. Le radar ne pouvait pas détecter les petits oiseaux volant seuls (passereaux en migration nocturne par exemple), qui représentent une part importante de la migration. Seul un radar dédié à ce type de suivi, avec une antenne verticale, permet d'étudier cette question particulière.

Malgré ces limites, le radar a permis l'acquisition de données de déplacements d'oiseaux pendant plus de 2700 heures sur une année, de jour comme de nuit, ce qui constitue une pression d'observation sans commune mesure avec les autres types de suivi.

Au niveau des résultats, le suivi a permis de caractériser les mouvements d'oiseaux sur un rayon de 6 km autour du radar, par heure et par saison.

Sur l'année étudiée, les mouvements augmentent à partir de la fin de l'hiver jusqu'à la fin de la migration pré-nuptiale (avril/mai), puis diminuent à des niveaux faibles en période de reproduction (mai à juillet), avant d'augmenter à nouveau pour la migration post-nuptiale (juillet à octobre). C'est en octobre que la densité de mouvements enregistrée a été la plus importante, avec plus de 25 trajectoires par heure et par km².

En période de reproduction et d'hivernage, l'activité des oiseaux est maximale du lever du soleil à la fin de matinée. En période de migration, la phénologie horaire est complètement différente, avec un maximum d'activité enregistré entre le coucher du soleil et la première moitié de la nuit.

L'analyse des directions de vol a mis en évidence des comportements très différents en fonction des saisons, et en fonction des périodes de jour et de nuit. En période de migration par exemple, une part importante des flux s'opère selon un axe est-nord-est / ouest-sud-ouest (i.e. parallèle à la côte), ce qui était attendu au vu des observations classiquement réalisées depuis la côte. Mais des flux perpendiculaires, en direction ou en provenance des îles britanniques, ont été enregistrés sur certains mois, représentant parfois la majorité des déplacements migratoires, notamment nocturnes. Ces mouvements ont notamment été enregistrés en avril, mai, août et dans une moindre mesure en septembre.

Concernant les altitudes, les hauteurs de vol des oiseaux sont classiquement plus importantes en période de migration qu'en période de reproduction ou d'hivernage. La majorité des oiseaux détectés (de taille moyenne à grande pour rappel) ont toutefois été enregistrés à moins de 100 mètres de haut.

Ce suivi a permis de caractériser l'utilisation spatiale de la zone de projet du parc éolien en mer de Fécamp, avant l'installation et l'exploitation du parc. Les résultats pourront être comparés aux données obtenues lors de la phase d'exploitation, pour étudier l'effet du parc éolien en mer de Fécamp sur le déplacement des oiseaux.

Biotope Siège Social
22, boulevard Maréchal Foch
B.P. 58
34140 MÈZE
Tél. : +33 (0)4 67 18 46 20
www.biotope.fr

